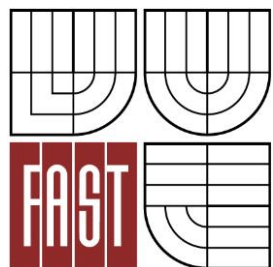




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

STUDENÉ ASFALTOVÉ SMĚSI S R-MATERIÁLEM

COLD ASPHALT MIXTURES WITH R-MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JAN ŠEVC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. Jan Ševc
Název Studené asfaltové směsi s R-materiálem
Vedoucí diplomové práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce 15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

TP208 Recyklace vozovek za studena,
TP210 Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací,
ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi, R-materiál
veřejně přístupné články a literatura z internetu
výzkumné zprávy zabývající se danou problematikou
diplomové práce z minulých let zabývající se podobnou problematikou
sborníky českých a zahraničních technických konferencí
apod.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Práce je zaměřená na sledování využití studených asfaltových směsí s využitím R-materiálu do konstrukce vozovek pozemních komunikací. Cílem práce je ověřit pomocí funkčních zkoušek vlastnosti cca 6 navržených studených asfaltových směsí pro vozovky s nízkým dopravním zatížením. Dalším cílem je ověřit možnosti dostupných přísad do R-materiálu s určitým množstvím zbytkového asfaltového pojiva.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Práce řeší využití R-materiálu do studených asfaltových směsí. Zabývá se studenou recyklací a vstupními surovinami, které se při technologii používají. Prakticky ověřuje vlastnosti R-materiálu a zbytkového asfaltového pojiva. Dále pomocí průkazných zkoušek stmelných směsí (pevnost v příčném tahu a odolnost proti vodě) ověřuje vlastnosti navržených studených asfaltových směsí. Následně je práce věnována experimentálnímu měření vybraných směsí pro zjištění dalších charakteristik. Zásadní pro pozitivní výsledky zkoušek těchto směsí je homogenita R-materiálu a také množství a stav zestárlého zbytkového asfaltového pojiva.

Klíčová slova

R-materiál, asfaltová emulze, rejuvenátory, recyklace za studena, podkladní vrstvy, pevnost v příčném tahu, modul pružnosti

Abstract

The thesis is focused on the use of R-material into cold asphalt mixtures. It deals with cold recycling and with input materials for this technology. It verifies properties of R-material and residues of bituminous binder. It also verifies properties of designed cold asphalt mixtures by the probative controls (indirect tensile strength and water resistance). Furthermore is focused on the experimental measurement of selected mixtures to ensure more characteristics. The amount of homogeneity of R-material, quantity and quality of residues bituminous binder is essential for positive results.

Keywords

R-material, asphalt emulsion, rejuvenators, cold recycling, sub-base, indirect tensile strength, modulus of elasticity (Young's modulus)

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Jan Ševc *Studené asfaltové směsi s R-materiálem*. Brno, 2016. 80 s., 35 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15.1.2016

.....
podpis autora
Bc. Jan Ševc

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D., za poskytnuté materiály k vypracování této práce, dále za čas, který mi věnoval při konzultacích, a především za cenné rady a připomínky směřované k mé práci. Mé poděkování také patří panu Pavlu Strakovi a Matěji Šafránkovi za pomoc a trpělivost při provádění laboratorních zkoušek. Nadále děkuji své rodině a blízkým za podporu po celou dobu mého studia.

OBSAH

1 ÚVOD.....	10
2 CÍLE PRÁCE.....	11
3 TEORETICKÁ ČÁST.....	12
3.1 Recyklace za studena.....	12
3.1.1 Recyklace na místě	12
3.1.2 Recyklace v míchacím centru.....	17
3.2 R-materiál	18
3.2.1 Klasifikace a značení R-materiálu	18
3.2.2 Výroba R-materiálu	18
3.2.3 Použití R-materiálu.....	20
3.3 Asfaltová emulze	22
3.3.1 Výroba	22
3.3.2 Typy asfaltových emulzí	23
3.3.3 Štěpení asfaltové emulze	23
3.3.4 Zkoušky asfaltových emulzí.....	24
3.3.5 Asfaltová emulze Paramo KATEBIT C 65 B 3	26
3.4 Cement.....	27
3.4.1 Výroba	27
3.4.2 Cement směsný CEM V/A (S-V) 32,5 R	27
3.5 Regenerační přísady	27
3.5.1 Stárnutí asfaltového pojiva	27
3.5.2 Rejuvenátory.....	28
4 PRAKTICKÁ ČÁST	30
4.1 Průkazní zkoušky R-materiálu	30
4.1.1 Stanovení zrnitosti R-materiálu	31
4.1.2 Extrakce pojiva z R-materiálu	33
4.1.3 Stanovení zrnitosti kameniva v R-materiálu po extrakci pojiva.....	35
4.1.4 Znovuzískání extrahovaného pojiva z R-materiálu	36
4.1.5 Stanovení penetrace jehlou na extrahovaném pojivu	37
4.1.6 Stanovení bodu měknutí na extrahovaném pojivu	38
4.1.7 Stanovení maximální objemové hmotnosti R-materiálu	39
4.1.8 Stanovení zhutnitelnosti R-materiálu	41
4.1.9 Zhutnitelnost - Proctor modifikovaný	42

4.1.10	Zhutnitelnost – Vibrační pěch	44
4.1.11	Zhutnitelnost – Lisování	46
4.2	Studené asfaltové směsi	48
4.2.1	Použité materiály	48
4.2.2	Přehled směsí	48
4.2.3	Výroba směsí	50
4.3	Průkazní zkoušky studených asfaltových směsí	51
4.3.1	Výroba zkušebních těles	51
4.3.2	Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti	52
4.3.3	Stanovení pevnosti v příčném tahu	55
4.3.4	Stanovení odolnosti proti vodě	60
4.4	Experimentální měření studených asfaltových směsí	62
4.4.1	Výroba zkušebních těles	62
4.4.2	Stanovení pevnosti v tlaku (28 denní)	63
4.4.3	Stanovení modulu pružnosti (28 denní)	66
5	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
	SEZNAM TABULEK	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM GRAFŮ	77
	SEZNAM ROVNIC	78
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	79
	SEZNAM PŘÍLOH	80

1 ÚVOD

Významným faktorem ovlivňujícím rozvoj hospodářství je dostatečně rozvinutá silniční infrastruktura. Je zapotřebí silný finanční tok proudící nejen do výstavby nových komunikací, ale převážně do údržby stávající silniční sítě. S rostoucím trendem úspor v silničním stavitelství, roste snaha využívat stávající materiál z vozovek do nových konstrukčních vrstev. Recyklace vozovek se stala jedním z nástrojů pro zachování udržitelného rozvoje a zároveň respektování ochrany životního prostředí. Měla by být uplatněna za předpokladu, že bude ekonomicky efektivní. Proto je důležité dbát na správný způsob využívání recyklovaných materiálů, pro dosažení maximálního možného zhodnocení. Na recyklované materiály je nutné pohlížet jako na skupinu „standardních“ materiálů, pouze s tím rozdílem, že je potřeba recyklátům věnovat zvýšenou pozornost v oblasti kontroly jakosti. Recykláty bývají nehomogenní a jejich chování nemusí být vždy předvídatelné. Pokud však tyto materiály splňují určité požadavky, mohou být uplatněny při výstavbě nebo rekonstrukci vozovek stejně jako klasické materiály bez snížení kvality stavebního díla.

V poslední době je v Česku věnována pozornost především R-materiálu, recyklátu, který patří do skupiny stavebně demoličního odpadu, vzniklého při recyklacích asfaltových vrstev vozovky. Efektivní využívání R-materiálu v silničním stavitelství se velmi odvíjí od používaných technologií. V České republice je snaha navrhovat horké asfaltové směsi s co největším podílem R-materiálu. Při současné výrobě asfaltových směsí v Česku, je výsledkem této snahy dávkování R-materiálu okolo 20 až 40 % v závislosti na typu vrstvy. Snahou některých firem je toto dávkování zvýšit s použitím tzv. paralelního bubnu pro ohřev R-materiálu. Právě při použití paralelního bubnu je možné razantně zvýšit dávkování R-materiálu (až 80 %). Snaha zvýšit dávkování R-materiálu je však v České republice omezena legislativou. V zahraničí je běžné dávkování R-materiálu do horké asfaltové směsi okolo 50 až 60 % (při použití paralelního bubnu), to je zapříčiněno nízkou výkupní cenou R-materiálu a vhodným skladováním tohoto recyklátu na obalovně.

Tato práce je zaměřena na studené asfaltové směsi s R-materiálem, vznikající při recyklaci za studena. Recyklace za studena je technologie, při níž je rekonstruována stávající konstrukce vozovky, a veškeré rozpojené kamenivo je znovu použito do nově pokládané vrstvy. Recyklace za studena na místě je technologie, při níž žádné nové recyklované kamenivo nevzniká, protože je použito jako kostra kameniva ve studené asfaltové směsi v nově položené podkladní vrstvě vozovky. Tato technologie je nejvíce rozšířená na silnicích s nižším dopravním významem (obvykle nejvíce porušené silnice III. třídy), protože zesiluje a zhomogenizuje stávající porušenou konstrukci vozovky. R-materiál vzniká při opravách nebo údržbách pozemních komunikací, kdy je frézován stávající kryt netuhé vozovky, nebo další asfaltové vrstvy. R-materiál bývá odvážen na obalovnu, kde je použit do horké asfaltové směsi. Dále je možné R-materiál odvážet do míchacího centra pro výrobu studené asfaltové směsi. Kostra těchto recyklovaných studených směsí bývá tvořena výhradně z R-materiálu (pro úpravu zrnitosti je možné použít drobné drcené kamenivo), který je stmelěn asfaltovou emulzí, cementem nebo pěnoasfaltem. Možné je také použít kombinaci různých pojiv např. asfaltové emulze a cementu. Tyto studené asfaltové směsi jsou používány jako podkladní vrstvy málo zatížených vozovek (silnice III. třídy a místní komunikace). Možné použití těchto směsí je na účelových komunikacích, zde mohou být opatřeny nátěrem a sloužit jako krytové vrstvy. Tato práce je v praktické části věnována studeným asfaltovým směsím s R-materiálem, které jsou vyráběny při použití technologie recyklace za studena v míchacím centru.

2 CÍLE PRÁCE

Teoretická část

Cílem teoretické části této práce je popsat používané technologie při provádění recyklací netuhých vozovek za studena. Dále popsat možnosti použití těchto technologií a podrobněji rozebrat vstupní materiály pro studené asfaltové směsi. Zejména R-materiál a asfaltovou emulzi. Teoretická část práce také popíše regenerační přísady (rejuvenátory) pro úpravu vlastností zbytkového pojiva v R-materiálu.

Praktická část

Cílem praktické části je navrhnout vhodnou recepturu studené asfaltové směsi pro podkladní vrstvy málo zatížených vozovek, při použití technologie recyklace za studena v míchacím centru. Dále je snahou zefektivnit dávkování R-materiálu do asfaltových směsí a vytvořit tak plně recyklovanou asfaltovou směs. Návrh receptur jednotlivých směsí vychází z technických podmínek TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena. Pro splnění kvalitativních požadavků budou tyto směsi stmelené asfaltovou emulzí a kombinací asfaltové emulze a cementu. Dále je snahou vyzkoušet účinnost dostupných přísad (rejuvenátorů) za běžných teplot (do 60 °C), které svými chemickými vlastnostmi upravují vlastnosti degradovaného asfaltového pojiva v R-materiálu. V praktické části práce budou provedeny popisující zkoušky R-materiálu, především zrnitost, extrakce pojiva a zhutnitelnost. Dále budou provedeny průkazní zkoušky navržených studených asfaltových směsí a bude provedeno experimentální měření vybraných směsí pomocí některé z funkčních zkoušek.

3 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část se věnuje recyklaci za studena a vstupními materiály, používanými při této technologii. Je rozdělena do pěti kapitol. Popisuje technologické postupy, které se používají při studených recyklacích. Dále popisuje vstupní suroviny používané při těchto technologiích. Jmenovitě R-materiál, asfaltovou emulzi, cement a regenerační přísady (rejuvenátory). Teoretická část se zabývá, v České republice velice rozšířenou, recyklací za studena na místě a méně rozšířenou recyklací za studena v míchacím centru. Následuje klasifikace R-materiál a popisuje způsob značení R-materiálu, jeho výrobu a možnosti použití. Kapitola o asfaltové emulzi charakterizuje složení, výrobu a jednotlivé typy asfaltových emulzí. Dále popisuje zkoušky, které jsou na asfaltových emulzích prováděny. Následně je popsána výroba a složení cementu. Poslední kapitola je věnována regeneračním přísadám. V teoretické části jsou popsány materiály, které byly použity v praktické části práce. R-materiál, asfaltová emulze Paramo KATEBIT C 65 B 3, cement směsný CEM V/A (S - V) 32,5 R, Paramo Reju 553, Paramo Reju 182 a Paramo Reju 161.

3.1 RECYKLACE ZA STUDENA

3.1.1 Recyklace na místě

Recyklace na místě je technologický postup studených recyklací, při kterém je stávající vrstva vozovky rozpojena, upravena a následně znovu položena na stejné místo. Tento proces je prováděn pomocí mobilního recyklačního zařízení (fréza a speciální strojní sestava), proto není potřeba převážet velké objemy materiálu. Pro použití recyklace na místě musí kamenivo ze stávající konstrukce splňovat určité vlastnosti, které musí být předem ověřeny (např. zrnitost, vlastnosti zbytkového asfaltového pojiva v R-materiálu). Recyklace na místě se může dle prováděné hloubky rozdělit do dvou kategorií, celková (hloubka cca do 250 mm) a částečná (hloubka cca do 150 mm). Celková recyklace je obvykle prováděna na velmi porušených vozovkách síťovými trhlinami a trvalými deformacemi. Výhodné je tuto recyklaci použít na vozovky s krytem z penetračního makadamu opatřeného nátěry. Dříve prováděný kryt z penetračního makadamu může obsahovat karcinogenní dehtová pojiva, jejichž použití je dnes zakázané. Vrstva s obsahem dehtového pojiva může být rozpojena a znovu položena do konstrukce vozovky v případě, že je pro stmelení této vrstvy použito hydraulické pojivo (cement) a to ve stanoveném poměru. Rozpojená zrna obalená dehtem jsou při recyklaci obalena cementovou kaší, která po zatvrdnutí karcinogenní dehet zapouzdří a tím se nově položená vrstva stane způsobilou. Částečná recyklace je prováděna na asfaltových krytových vrstvách, které jsou povrchově porušeny zejména ztrátou asfaltového tmelu, hloubkovou korozí, mozaikovými trhlinami, případně výtluky. Recyklace může být provedena s předdrcením kameniva (rozproštěním drobného drceného kameniva na stávající povrch recyklované vrstvy) pro zlepšení výsledné zrnitosti. Tato recyklace je obvykle prováděna s přidáním pojiva, kde nová vrstva je obvykle podkladní konstrukční vrstvou s maximální velikostí zrna kameniva ve směsi 22 mm [17].

Bez použití pojiva

- **Recyklace krytu a podkladních vrstev bez použití pojiva (celková recyklace)**

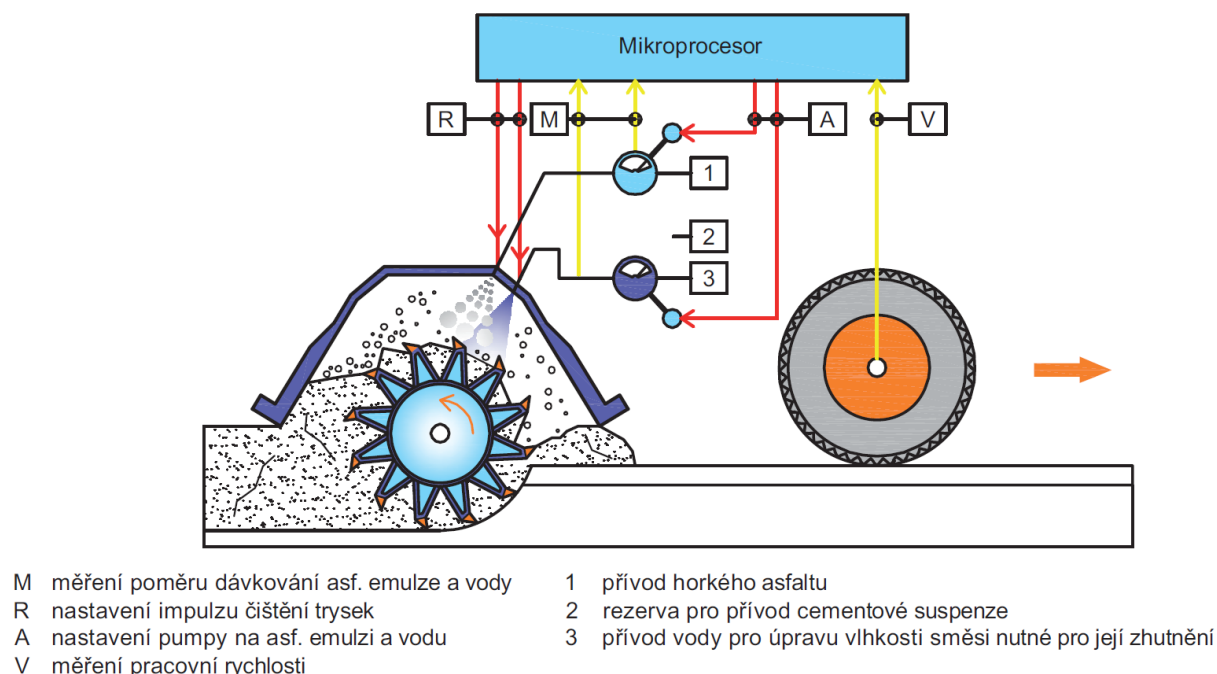
Recyklace krytu a podkladních vrstev bez použití pojiva je prováděna především za účelem reprofilace a homogenizace nestmelených vrstev. Pokud je kryt vozovky z asfaltových vrstev, měli by být před touto recyklací odstraněny, protože cílem je recyklovat především podkladní vrstvy do maximální možné hloubky (obvykle do hloubky 250 mm). Pro zlepšení zrnitosti je možné přidat další materiál (např. kamenivo frakce 0/4). Tento přídatný materiál je přidáván

před rozpojováním konstrukce na stávající povrch. Původní konstrukce je rozpojena frézou, následně promíchána a položena. Pro pokládku a hutnění jsou používány běžné mechanizmy. Výsledkem této recyklace je vrstva např. šterkodrtě. Důležitá je kontrola recyklovaného materiálu, především zrnitost a kvalita jemných částic [17, 30].

Pozn.: Příklad značení mechanicky zpevněného kameniva (MZK) vyrobeného z recyklovaného kameniva frakce 0/32 mm, v tloušťce 200 mm: **RS MZK 0/32 G_c; 200 mm; TP 208**.

S použitím pojiva

Stmelené vrstvy vytvořené studenou recyklací na místě jsou stmeleny asfaltovou emulzí, cementem, kombinací cementu a vápna, kombinací asfaltové emulze a cementu, ale také pěnoasfaltem. Cement je použit při potřebě rychlého nárůstu pevnosti konstrukce nebo v případě nehomogenního materiálu. Kombinace cementu a vápna lze použít pro vrstvy, které jsou znečištěné např. jílovitými příměsemi. Stmelení asfaltovou emulzí lze použít pro většinu recyklovaných asfaltových vrstev. Použití kombinace asfaltové emulze a cementu je výhodné pro zajištění vyšší pevnosti a zároveň docílit větší flexibility [30].



Obr. 3.1 - Schéma činnosti recyklační frézy [17, s. 232]

Pozn.: Značení stmelených vrstev je podobné jako u nestmelených. V tomto označení je uvedená značka použitého pojiva. C = cement; H = hydraulické pojivo; A = asfaltové pojivo (asfaltová emulze, zpěněný asfalt); CA = cement + asfaltové pojivo; HA = hydraulické pojivo + asfalt. Příklad značení směsi kameniva frakce 0/32 mm, v tloušťce 220 mm vyrobenou při recyklaci na místě za použití cementu a asfaltové emulze: **RS 0/32 CA (na místě); 220 mm; TP 208**.

• Recyklace krytu a podkladních vrstev (celková recyklace)

Pro recyklaci krytu a podkladních vrstev jsou používány již zmíněná pojiva. Neexistuje však obecné pravidlo, které by určovalo konkrétní použitelné pojivo. Rozpojování stávající konstrukce vozovky, promíchání rozpojeného materiálu s pojivem a případně vodou je prováděno recyklační frézou. Rozpojování musí být provedeno v dostatečné šířce pro zajištění

potřebných okrajů pro navazující vrstvy. Kamenivo pro zlepšení zrnitosti bývá přidáváno před rozpojením stávající konstrukce. Pojiva jsou dávkována pomocí recyklační frézy. Tato fréza může být doplněna rozdělovacím šnekem a hutnicí lištou, pro rozrovnání a hutnění stmelené směsi. Takto vytvořené recyklované vrstvy musí být dohutněny válci na požadovanou míru zhutnění. Recyklace může být prováděna při teplotách vyšších než +5 °C. V případě, že se jedná o směs stmelené hydraulickými pojivy, musí být povrch nově položené vrstvy alespoň 7 dní udržován vlhký, aby nedocházelo k tvorbě smršťovacích trhlin během hydratace [17].



Obr. 3.2 - Recyklace podkladních vrstev s použitím pojiva [27]

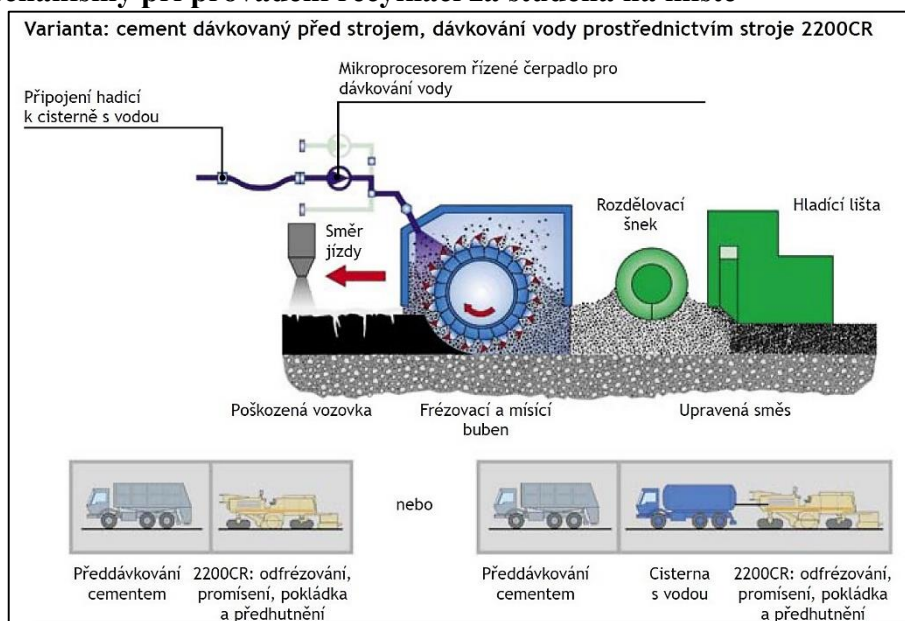
- **Recyklace asfaltových vrstev (částečná recyklace)**

Recyklace asfaltových vrstev na místě za studena je prováděna za běžných teplot bez jakéhokoliv nahřívání stávající konstrukce. Jako pojivo bývá použita asfaltová emulze, která pro zlepšení přilnavosti ke kamenivu může být předeřhřáta. Tvrdnutí stmelené vrstvy asfaltovou emulzí začíná štěpením emulze. Jako pojivo může být použit zpeňný asfalt. V tomto případě musí být použita mechanizace, která zajistí dostatečné obalení zrn rozpojené konstrukce pěnoasfaltem. Kvalita asfaltových vrstev prováděných za horka a za studena je diametrálně odlišná. Proto recyklací asfaltových vrstev za studena vznikne obvykle ložní nebo převážně podkladní vrstva vozovky pro nižší dopravní zatížení [17].



Obr. 3.3 - Recyklace asfaltových vrstev za studena [28]

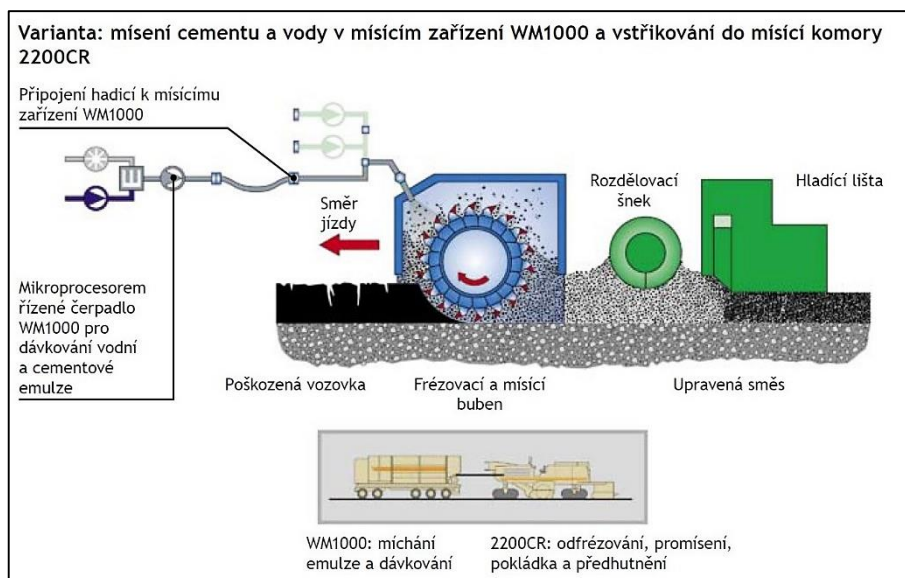
Strojní mechanizmy při provádění recyklací za studena na místě



Obr. 3.4 - Recyklace na místě s použitím cementu – dávkování před recyklační frézou [26]

Výhodou této technologie je jednoduchost strojní sestavy. Pro dávkování cementu lze použít standardní distributor používaný pro zlepšování podloží.

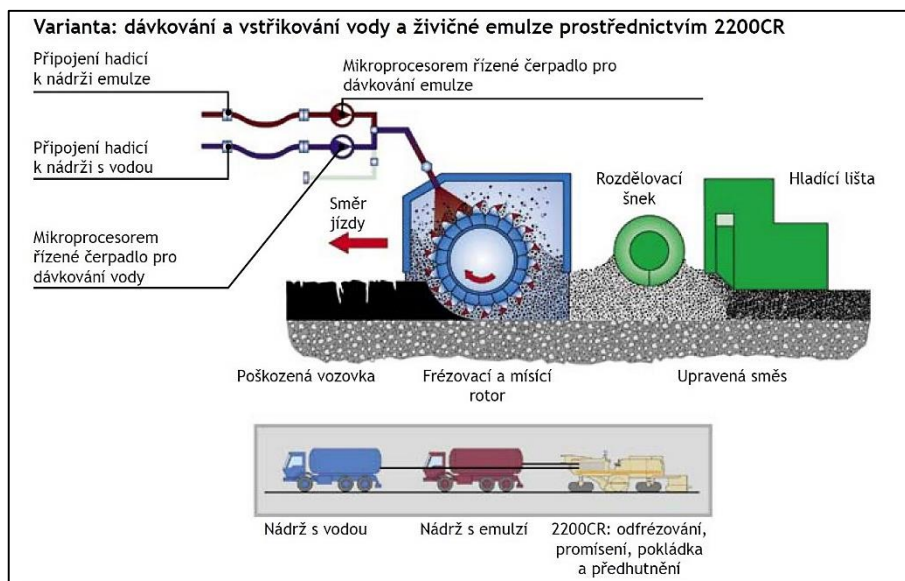
Nevýhodou je prašnost. Cement dávkovaný před recyklační frézou může být unášen větrem. Prašnost omezuje použití této technologie v intravilánu.



Obr. 3.5 - Recyklace na místě s použitím cementu – vstřikování cementové suspenze do recyklační frézy [26]

Výhodou této technologie je eliminace prašnosti. Cement je společně s vodou dávkován do míšícího zařízení a smíchaná cementová suspenze je přímo vstřikována do recyklační frézy.

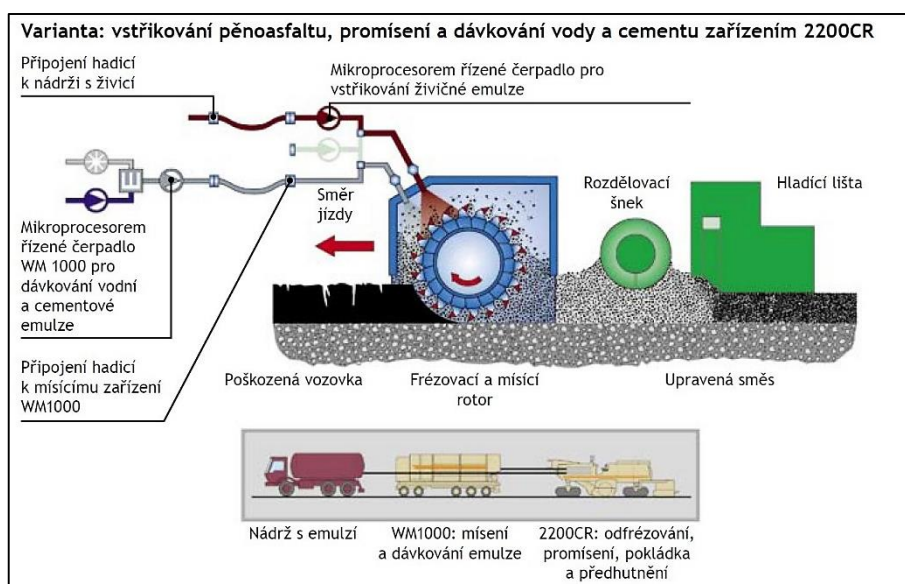
Nevýhodou je právě zařízení na míchání cementové suspenze, které je poměrně složité. Také je obtížné měnit konzistenci cementové suspenze v průběhu recyklace. Množství vody v cementové suspenzi ovlivňuje optimální vlhkosti nově pokládané vrstvy.



Obr. 3.6 - Recyklace na místě s použitím asfaltové emulze – dávkování emulze do recyklační frézy [26]

Výhodou této technologie je jednoduchost strojní sestavy a nízká prašnost.

Nevýhodou je nižší kvalita výstupní recyklované vrstvy. Přílnavost emulze ke kamenivu je závislá na povětrnostních podmínkách. Při rychlé změně počasí (děšť), může být nově pokládaná vrstva pružná a obtížně zhutnitelná.



Obr. 3.7 - Recyklace na místě s použitím asfaltové emulze/pěnoasfaltu + cementu – dávkování pojiv do mísicího zařízení [26]

Výhodou této technologie je kvalita výstupní recyklované vrstvy. V České republice je tato technologie ověřená a nejvíce používaná.

Nevýhodou je nutnost mísicího zařízení pro cementovou suspenzi a také synchronizace dávkování obou pojiv do recyklační frézy.

3.1.2 Recyklace v míchacím centru

Recyklace za studena v míchacím centru je proces, při kterém vzniká studená asfaltová směs z předem připravených vstupních surovin. Kamenivo (R-materiál) je již nadrceno a přetříděno. V míchacím bubnu se R-materiál míchá s předem stanoveným pojivem. Pojiva a jejich kombinace jsou stejné jako u technologie recyklace za studena na místě. Jedná se tedy o asfaltovou emulzi, cement, kombinaci emulze a cementu, je možné také použít zpěněný asfalt či vápenný hydrát. Podle technologie míchacích zařízení je možno recyklaci v centru dělit do tří kategorií. Stacionární, semimobilní a mobilní míchací zařízení. Vyrobená směs je nakládána na nákladní automobily nejčastěji pomocí pásového dopravníku. Pro pokládku směsi jsou používány běžné finišery. Po dobu zrání vrstvy je sledována její vlhkost (především v případě použití hydraulických pojiv). Dále je na zhotovené vrstvě kontrolováno množství vody ve směsi a mezerovitost. Na vyžralou směs bývá pokládána horká asfaltová směs nebo nátěr. Při použití do komunikací s nízkým dopravním významem je výhodné použít studenou asfaltovou směs jako podkladní asfaltovou vrstvu, na kterou se kladou další asfaltové vrstvy (ložní a obrusná). Pro účelové komunikace je možné použít studenou asfaltovou směs do krytu vozovky a je výhodné tuto krytovou vrstvu opatřit nátěrem, který uzavře povrch krytu a zamezí tak pronikání vody do konstrukce vozovky [17, 30].



Obr. 3.8 - Mobilní míchací zařízení [27]



Obr. 3.9 - Recyklace v centru [27]

Výhody recyklace za studena v míchacím centru:

- využití R-materiálu (již odfrézovaného nebo nadrceného)
- možnost kontroly kvality vstupních surovin
- energeticky nenáročná výroba
- použití běžných mechanismů pro pokládku směsí

Výhody recyklace za studena na místě [26]:

- rychlé a kvalitní opravy vozovek
- 100 % využití recyklovaného materiálu
- zvýšení únosnosti vozovky
- homogenizace podkladních vrstev
- zamezení vzniku příčných trhlin
- pasivace obsaženého dehtového pojiva
- nižší zatížení životního prostředí

3.2 R-MATERIÁL

3.2.1 Klasifikace a značení R-materiálu

R-materiál je klasifikován podle ČSN EN 13108-8. Jelikož jde o stavebně demoliční odpad, sleduje se obsah ostatních materiálů v R-materiálu podle Technických podmínek TP 210.

„**R-materiál** je asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. Jedná se o více jak 95 % asfaltových materiálů (Ra), s max. obsahem 5 % hm. ostatních recyklovaných materiálů (Rc+Rb+Ru+X+Y+FL).“ [2, s. 5]

Pozn.: Rc beton, betonové výrobky, malta, betonové zdící prvky.

Rb pálené zdící prvky např. cihly a tvárnice, vápenopískovcové zdící prvky, neplovoucí pórobeton.

Ru nestmelené kamenivo, přírodní kámen, kamenivo ze směsi stmelené hydraulickým pojivem.

X jiné částice (% hm.) jako jíl a další přilnavé nečistoty, kovy (železné a neželezné), neplovoucí dřevo, stavební plasty a pryž, sádrová omítka.

Y ostatní částice (% hm.) jako papír, polyetylenové obaly, textil, organické materiály, apod. Z hlediska stanovování obsahu ostatních částic (Y) se přiřazují při zkoušce podle ČSN EN 933-11 ke složce jiných částic (X).

FL plovoucí částice ($\text{cm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) podle ČSN EN 933-11 – plovoucí dřevo, polystyrén, apod. [2, s. 21]

Označení R-materiálu „U RA d/D“

R-materiál se musí označit značkou RA, kterou předchází označení zrnitosti R-materiálu (U) a po ní následuje označení zrnitosti kameniva (d/D) v mm. Kde (U) je maximální velikost zrna, (d) je velikost dolního síta a (D) je velikost horního síta. Pro R-materiál je ($d = 0$) [3].

Pozn.: Např. označení: 40 RA 0/8 mm: R-materiál, jehož kamenivo má velikost horního síta 8 mm a zrna asfaltové směsi maximální velikost 40 mm [3].

3.2.2 Výroba R-materiálu

Vybourání a drcení starých asfaltových desek

Vybourávání vozovky je možné provádět dvěma způsoby. První možnost je vybourání celé konstrukce, následně provádět drcení a třídění jednotlivých materiálů. Mnohem výhodnější je vybourávání vozovky po jednotlivých konstrukčních vrstvách. Při tomto postupu je získaný materiál více homogenní a následné třídění je omezeno na minimum. K rozpojování konstrukčních vrstev vozovky se používají rozrývače či rýpadla s nástavcem pneumatického kladiva, nebo pomocí strojů k tomu určených [17, 25].



Obr. 3.10 - Vybourávání asfaltových vrstev vozovky [23]



Obr. 3.11 - Drcení R-materiálu [24]

Drcení a třídění R-materiálu

Drtící jednotky se dělí podle technologie zpravidla do 3 skupin:

- stacionární (stabilní, nepřemístitelné, v místech stálého přísunu materiálu)
- semimobilní (demontovatelné, přemísťované obvykle na stavby většího charakteru)
- mobilní (pojízdné stroje drtící materiál přímo na stavbě)

Drtiče v drtících jednotkách se používají kuželové, čelistové, odrazové a válcové. Kuželové jsou spolehlivé, mají nízké náklady na provoz a údržbu a poskytují vysokou kvalitu konečného produktu. Čelistové jsou schopny zpracovávat velké kusy materiálu a mají vysoký výkon. Odrazové drtiče mají široké spektrum uplatnění. Existují jak horizontální, tak vertikální odrazové drtiče, které mohou měnit rychlost otáčení rotujících lopatek. Změnou rychlosti otáčení je možné měnit zrnitost výstupních surovin. Válcové drtiče jsou vhodné pro získání jemných frakcí. Poslední proces při získání R-materiálu je třídění. R-materiál je obvykle tříděn do následujících frakcí: 0/8, 0/11, 0/16, 0/22, 0/32 a 0/45 mm. Pro další použití R-materiálu je rozhodující vlhkost. Z tohoto důvodu se doporučuje R-materiál skladovat zastřešený [17, 25].

Frézování asfaltových vrstev

Tato technologie získávání R-materiálu je prováděna teplou, nebo studenou cestou. Rozšířenější je frézování za studena, vzhledem k vysokému výkonu silničních fréz. Frézování je výhodné provádět pro odstranění porušených krytových vrstev, při rekonstrukcích, kdy je nutné zachovat původní niveletu. Frézováním lze provádět i údržbu ve smyslu zdrsnění povrchu vozovky, nebo pro vyrovnání plošných nerovností. Frézování po vrstvách zaručuje stejnorodost získaného recyklátu, avšak při frézování slabých vrstev mohou vznikat oválná zploštělá zrna, která se mohou drtit až při pokládce směsi vlivem tlaku hutnicích válců. Takto rozdrčená zrna mohou ve výsledné vrstvě (především stmelené) tvořit drobné kaverny, které jsou nežádoucí. Možné je také frézovat celou konstrukci vozovky. Tato technologie zaručí lepší homogenitu R-materiálu, i přesto že není zaručena stejnorodost frézovaných vrstev. Odfrézovaný R-materiál z vysokých vrstev je kvalitativně srovnatelný s R-materiálem vyrobeným v recyklačním centru [17, 25].



Obr. 3.12 - Frézování vozovky [22]

3.2.3 Použití R-materiálu

Nestmelené směsi

R-materiál je možné použít do nestmelených vrstev, kde nahrazují šterkodrt', případně mechanicky zpevněné kamenivo. Při provádění nestmelených vrstev z R-materiálu je důležité správné vlhčení směsi, pro dostatečné zhutnění. I přes dostatečné zhutnění může docházet k trvalým deformacím nestmelené vrstvy vlivem pomalu jedoucích nebo zastavujících těžkých nákladních vozidel. Asfaltové slepence se vlivem vysokého tlaku nevratně dotvarovávají, a proto vznikají trvalé deformace vozovky [17].

Horké asfaltové směsi

Efektivnější je použít R-materiál jako kamenivo do asfaltových směsí. Při výrobě asfaltových směsí je použití R-materiálu podmíněno selektivním frézováním vrstev, pečlivým tříděním, aby byl získaný R-materiál co nejvíce homogenní a kvalitativně srovnatelný. Výhodné je použít R-materiál pro horké asfaltové směsi. Množství R-materiálu v horké asfaltové směsi je ovlivněno použitou technologií při výrobě. Množství R-materiálu při výrobě asfaltové směsi v šaržové obalovně bez paralelního bubnu je okolo 20 % hm. v závislosti na typu asfaltové směsi (např. ACL, ACP, VMT). Výrazně většího dávkování R-materiálu (až 80 % hm.) do asfaltové směsi je možné docílit výrobou v šaržové obalovně s paralelním bubnem pro ohřev R-materiálu, nebo při výrobě směsi v kontinuální obalovně s předeřhříváním R-materiálu. Zásadní vlastnost R-materiálu ovlivňující dávkování do horkých asfaltových směsí je vlhkost. V šaržových obalovnách bez paralelního bubnu je dávkování R-materiálu nepřímo úměrné s rostoucí vlhkostí, proto se doporučuje skladovat R-materiál zastřešený [17].

Studené asfaltové směsi

Studené asfaltové směsi s R-materiálem jsou používány pro podkladní vrstvy. S tím souvisí používané technologie recyklace za studena na místě, při kterých vzniká R-materiál odfrézováním stávajících asfaltových vrstev. Ten je stmelen asfaltovou emulzí, cementem nebo kombinací těchto dvou pojiv a znovu položen jako podkladní stmelená vrstva vozovky. Jako pojivo může být též použit zpěněný asfalt. Z těchto poznatků vyplývá, že R-materiál je stěžejním vstupním materiálem při studených recyklacích. V následující tabulce jsou uvedeny doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro stmelené směsi [1].

Pozn.: Zpěněný asfalt je asfaltové pojivo (silniční asfalt 50/70, 70/100, 100/150 nebo 160/220), který vzniká řízeným procesem přidáváním malého množství vody pod tlakem do horkého asfaltu [1, 17].

Tab. 3.1 - Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro stmelené vrstvy [1, s. 8]

Vlastnost		Požadavky na recyklované kamenivo při použití pojiva		
		cement nebo jiné hydraulické pojivo	cement + asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt	asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt
Ozn. směsi	recyklace na místě	0/32; 0/45; 0/63		0/32
	recyklace v centru	0/16; 0/22; 0/32; 0/45		0/16; 0/22; 0/32
Max. obsah jemných částic		f_{15}	f_{15}	f_6
Kvalita jemných částic		$I_p \leq 17$	$I_p \leq 17$	-
Nadsítne		10 %	10 %	10 %

Tab. 3.2 - Požadavky na recyklované stmelené směsi [1, s. 10]

Vlastnost		Požadavky pro směs s použitím pojiva		
		cement nebo jiné hydraulické pojivo	cement + asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt	asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt
Ozn. směsi	recyklace na místě	0/32; 0/45		0/32
	recyklace v centru	0/16; 0/22; 0/32; 0/45		0/16; 0/22; 0/32
Požadavky na zrnitost směsi ^{1), 2)}		TP 208 – Příloha A		
Laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost		deklarovaná hodnota		
Vlhkost ³⁾		-3 % až +2 %		
Min. pevnost v tlaku R_c po 28 dnech ⁴⁾ Odolnost proti mrazu a vodě		$C_{3/4}$ 85% pevnosti R_c	-	-
Min. pevnost v příčném tahu R_{it} ⁵⁾ po 7 dnech Odolnost proti vodě min. (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě)		0,30 až 0,70 MPa 75% pevnosti R_{it}	0,30 až 0,70 MPa 75% pevnosti R_{it}	0,30 MPa 60% pevnosti R_{it}
Mezerovitost		-	-	6% až 14%
<p>1) Doporučené požadavky pro směs před přidáním pojiva.</p> <p>2) U složky R-materiálu se uvažuje kusová zrnitost.</p> <p>3) Doporučené max. odchylky od deklarované hodnoty.</p> <p>4) Zkouší se jako směs stmelená cementem podle ČSN EN 14227-1, další zkouška pevnosti v příčném tahu (R_{it}) a odolnosti proti vodě se pak neprovádí. Je možno navrhovat směsi i vyšších tříd pevnosti.</p> <p>5) Pro TZD IV, V, VI a směsi odpovídající třídě pevnosti $C_{3/4}$ podle ČSN EN 14227-1 je možno nahradit zkoušku pevnosti v tlaku (R_c) a odolnosti proti mrazu a vodě.</p>				

3.3 ASFALTOVÁ EMULZE

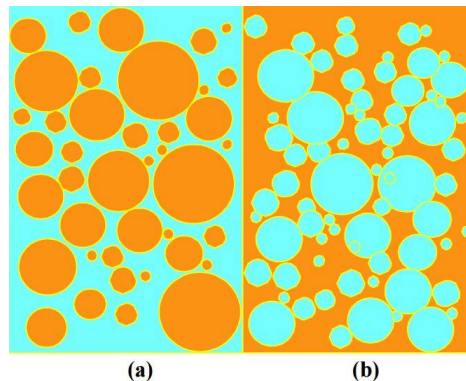
Emulze je obecně disperze mikroskopických částic jedné kapaliny ve druhé. Obě kapaliny mají různou hustotu a polaritu a jsou vzájemně samovolně nemísitelné. Jedna ze složek emulzí je obvykle voda. Emulze se dělí na dva typy [17]:

a) Olej ve vodě

Méně polární kapalina je rozptýlena v kapalině polárnější. Voda je tedy souvislá fáze, ve které jsou rozptýleny mikroskopické částice olejnaté kapaliny (např. asphalt).

b) Voda v oleji

Souvislá fáze je tvořena olejnatou kapalinou, ve které jsou rozptýleny mikroskopické částice vody.

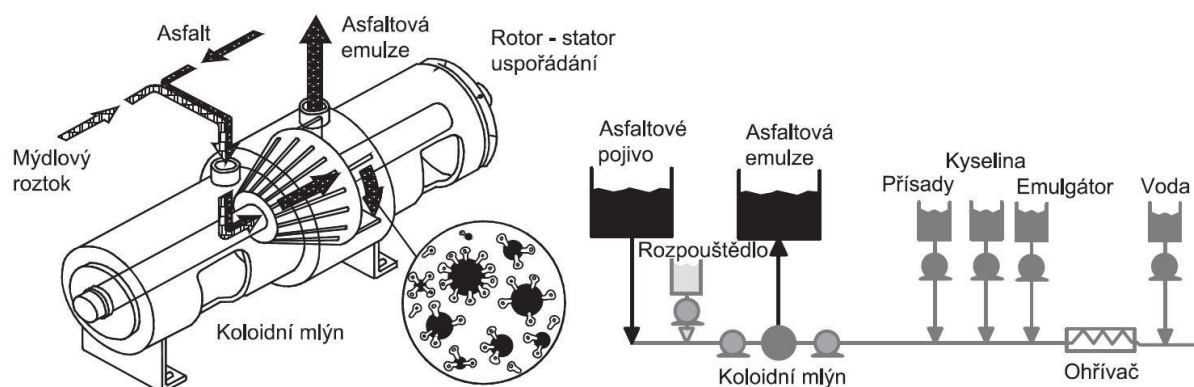


Obr. 3.13 - Typy emulzí [29, s. 2]

Asfaltová emulze je disperze mikroskopických částic jemně rozptýlených ve vodě, stabilizovaná vhodným emulgátorem. Oproti asfaltům mají asfaltové emulze výrazně nižší viskozitu a jsou zpracovatelné za běžných teplot. Technologie, při kterých se používá asfaltová emulze, se provádějí za studena, popřípadě s mírně zvýšenou teplotou asfaltové emulze [17].

3.3.1 Výroba

Pro vytvoření emulze ze dvou navzájem nemísitelných kapalin je třeba tyto kapaliny vystavit intenzivnímu míchání. Výroba probíhá mechanickým rozměňováním horkého asfaltu ve vodě pomocí koloidního mlýna. Mezi pohybující se rotor a stator koloidního mlýnu je vstřikovávána směs horkého asfaltu a vodní fáze, která obsahuje emulgátor. Rotor má drážkový povrch pro docílení turbulentního proudění napomáhající rozměňování asfaltové fáze. S tímto procesem současně probíhá adsorpce emulgátoru na povrchu fázového rozhraní asphalt – voda. Velikost částic asfaltu rozptýlených ve vodě je $(1 - 4) \mu$, výjimečně 10μ . Obsah asfaltu v emulzi je cca $(38 - 73) \%$, zbývající množství tvoří voda a přísady. Stálost emulze je zajištěna právě emulgátory. Emulgátory snižují povrchové napětí na rozhraní obou složek, což zajistí, aby se emulze nerozpadla na dvě původní složky. Charakter elektrického náboje mikroskopických částic asfaltu určuje použitý emulgátor. Podle charakteru elektrického náboje se dělí asfaltové emulze na kationaktivní a anionaktivní. Emulze mohou obsahovat modifikační přísady, které jsou přidávány do asfaltových emulzí po procesu emulgace. Emulze je možné také vyrábět z modifikovaného asfaltového pojiva. Asfaltové emulze mohou obsahovat rozpouštědla (fluxovadla), které jsou přidávány do asfaltové fáze. Emulze s rozpouštědly jsou používány například pro spojovací postřiky [17].

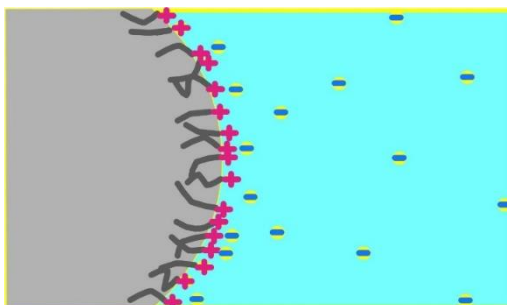


Obr. 3.14 - Koloidní mlýn a schéma kontinuálního míchacího zařízení [17, s. 117]

3.3.2 Typy asfaltových emulzí

Kationaktivní (kyselé) asfaltové emulze

Tento typ tvoří více jak 95 % emulzí používaných v silničním stavitelství. Pro výrobu kationaktivních emulzí se používají emulgátory na bázi aminů vyšších mastných kyselin, sloučených s anorganickými nebo organickými kyselinami. Kationaktivní emulze mají dobrou přilnavost ke kamenivu i při zvýšené vlhkosti [17].



Obr. 3.15 - Ionizace částic asfaltu kationaktivní emulze působením emulgátoru [29, s. 8]

Anionaktivní (zásadité) asfaltové emulze

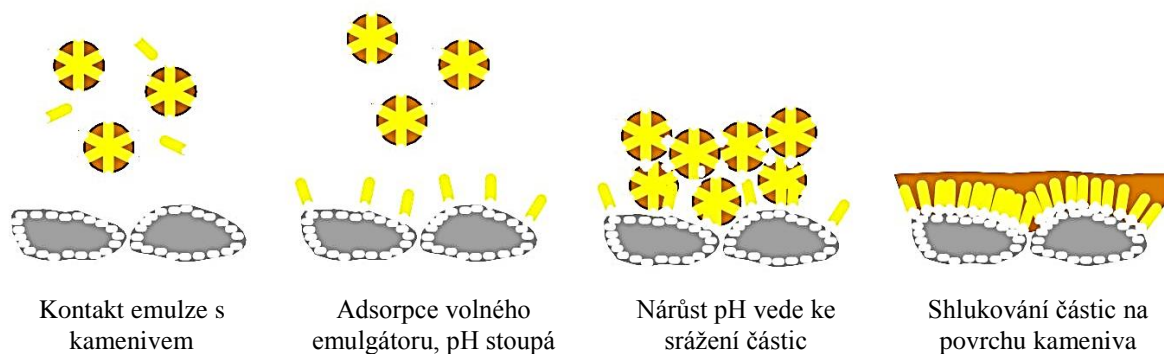
Emulgátory používané při výrobě těchto emulzí jsou většinou mýdla a aminové soli vyšších mastných kyselin. Jako katalyzátor je používán hydroxid draselný nebo hydroxid sodný. Přilnavost anionaktivních emulzí je pouze na zásadité (nelze použít žulu a křemenec) a suché kamenivo [17].

3.3.3 Štěpení asfaltové emulze

Asfaltová emulze se musí při aplikaci změnit na souvislou vrstvu asfaltu, která plní úlohu pojiva. Proces štěpení nastává v okamžiku, kdy se asfaltová emulze dostane do styku s kamenivem. Při styku s kamenivem dochází k adsorpci emulgátoru na povrch kameniva a zároveň vylučování mikroskopických částic asfaltu, které se nevratně oddělují od vodní fáze. Asfaltové emulze se dělí na rychloštěpné, středněštěpné a pomaluštěpné [17].

Rychlost štěpení [17]:

- závisí na chemických vlastnostech emulgátoru
- je nepřímo úměrná množství přidávaného emulgátoru
- závisí na jemnosti rozptýlených částic (jemnější emulze, pomalejší štěpení)
- závisí na pH hodnotě vodní fáze
- závisí na mineralogických vlastnostech kameniva a velikosti zrn kameniva
- závisí na teplotě (vyšší teplota, rychlejší štěpení)

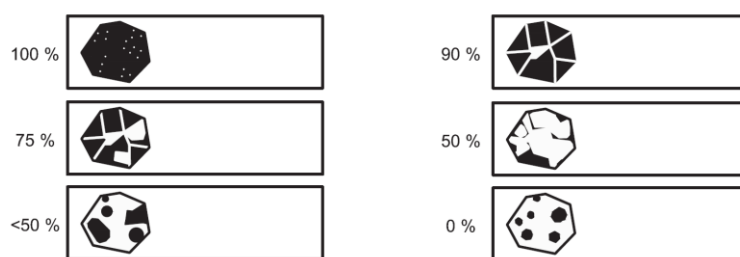


Obr. 3.16 - Fáze štěpení kationaktivní asfaltové emulze [29, s. 12]

3.3.4 Zkoušky asfaltových emulzí

Obsah asfaltu v emulzi se stanovuje podle obsahu vody. Tato voda je pomocí rozpouštědla nemísitelného s vodou vydestilována. Voda je od rozpouštědla při destilaci oddělována. Z odečteného obsahu vody a původní hmotnosti emulze je vypočítán obsah asfaltového pojiva v emulzi [17].

Přilnavost emulze ke kamenivu zkouškou ponořením do vody. Asfaltová emulze je promíchána s kamenivem podle stanoveného postupu. Smíchaná směs je po určité době zrání ponořena do vody a vizuálně se posuzuje procento povrchu kameniva, které je pokryté asfaltovou emulzí dle následujícího obrázku [17].



Obr. 3.17 - Typické příklady částečně obalených zrn kameniva [12, s. 8]

Doba výtoku asfaltové emulze je stanovena pomocí výtokového viskozimetru (Standard Tar Viscometer – STV). Pomocí viskozimetru je určena doba, za kterou proteče 50 ml vzorku otvorem 10,4 nebo 2 mm při stanovené teplotě [17].



Obr. 3.18 - Standard Tar Viscometer – STV [20]

Štěpitelnost. Hodnota štěpitelnosti je vyjádřena bezrozměrným číslem, které odpovídá množství referenčního fileru v gramech, potřebného pro vyštěpení 100 g asfaltové emulze. Do předepsaného množství míchané asfaltové emulze je přidáván konstantní rychlostí referenční filer. V době, kdy se směs zcela oddělí od nádobky, ve které je míchána, se emulze považuje za vyštěpenou. Hodnota štěpitelnosti je 100 násobek hmotnosti fileru vysypaného do emulze, vydělená hmotností emulze. Štěpitelnost je dělena do 10 tříd podle následující tabulky [17].

Tab. 3.3 - Třídy štěpitelnosti asfaltové emulze [17, s. 119]

Třída štěpitelnosti	Hodnota štěpitelnosti	Poznámka	
1	-	rychloštěpné emulze	štěpitelnost s filerem Forshammer
2	< 110		
3	70 – 155		
4	110 – 195		
5	> 170		
6	> 90	středněštěpné emulze	mísitelnost s filerem
7	≥ 180		
8	≥ 300		
9	> 2	pomaluštěpné emulze	mísitelnost s cementem
10	≤ 2		

Zbytek na sítu a skladovací stabilita. Předem stanovené množství asfaltové emulze je přefiltrováno přes připravené síto o velikosti otvorů 0,5 mm, nebo přes sadu dvou sít o velikosti otvorů 0,5 mm a 0,16 mm. Pojivo, které zůstane na sítu, je promyto a zváženo. Skladovací stabilita je dána množstvím zbylého pojiva na sítu s velikostí otvorů 0,5 mm po stanovené době skladování (n dnů) [17].

Vzhled. Emulze má mít hnědou až tmavohnědou barvu bez viditelných vloček vyštěpeného asfaltu [17].

pH emulze je stanoveno pH metrem, kdy hodnota pH je záporný dekadický logaritmus koncentrace vodíkových iontů v roztoku [17].

Koheze asfaltových pojiv zkouškou kyvadlem je prováděna ocelovou krychlí s velikostí strany 10 mm, pevně fixovanou k ocelové podstavě 1 mm silnou vrstvou pojiva. Tato sestava je zahřívána na teplotu zkoušky. Krychle je následně odražena úderem kladiva. Z úhlu pohybu kladiva je vypočítána energie absorbovaná pojivem. Měření je prováděno v rozsahu 6 teplot, přičemž je sledována maximální koheze pojiva [17].

Koheze asfaltových modifikovaných pojiv zkouškou silové duktility. Zkušební těleso daného tvaru je protahováno v duktilometru při zkušební teplotě a konstantní rychlosti do přetržení nebo do dotažení protažení minimálně 1 333 % (400 mm) [17].

3.3.5 Asfaltová emulze Paramo KATEBIT C 65 B 3

Jedná se o kationaktivní asfaltovou emulzi s obsahem pojiva 65 %, vyrobená ze silničního asfaltu, s třídou štěpitelnosti 3 (rychloštěpná emulze).

Pozn.: Tato emulze byla použita v praktické části práce.

Vlastnosti emulze [19]:

- | | |
|-----------------------------|--------|
| • Obsah pojiva | 65,2 % |
| • Hodnota štěpitelnosti | 113 |
| • Zbytek na sítu 0,5 mm | 0,03 % |
| • Doba výtoku C2/40 °C | 59,6 s |
| • Doba výtoku C4/40 °C | 8 s |
| • Přilnavost ¹⁾ | 100 % |
| • Obsah olejového destilátu | 0,5 % |
| • Zbytek na sítu po 7 dnech | 0,02 % |

Pozn.: 1) Jako kamenivo byl použit granodiorit z lomu Olbramovice, frakce 8/11.

Vlastnosti pojiva po zpětném získání z emulze [19]:

- | | |
|-----------------------|---------|
| • Penetrace při 25 °C | 83 p.j. |
| • Bod měknutí | 45,5 °C |

Vlastnosti pojiva po zpětném získání a stabilizaci [19]:

- | | |
|-----------------------|---------|
| • Penetrace při 25 °C | 58 p.j. |
| • Bod měknutí | 48,4 °C |
| • Bod lámavosti | -12 °C |

Vlastnosti pojiva po zpětném získání, stabilizaci a urychleném dlouhodobém stárnutí PAV [19]:

- | | |
|-----------------------|---------|
| • Penetrace při 25 °C | 26 p.j. |
| • Bod měknutí | 58,6 °C |

3.4 CEMENT

Cement je hydraulické pojivo (jemně mletá anorganická látka), které po smíchání s vodou vytváří cementovou kaši. Tuhnutí a tvrdnutí cementové kaše je důsledkem hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí je kaše stálá a zachovává svoji pevnost na vzduchu i ve vodě.

3.4.1 Výroba

Cement je vyráběn pálením slínekových surovin (vápenec, vápenaté jíly, slínovce a křemičitý písek) při teplotě 1 450 °C v rotačních pecích. Chemické složení cementu je upravováno přísadami, které regulují tuhnutí (např. sádrovec). Dále přísady snižující viskozitu kapalné fáze v průběhu výpalu (např. fluorit). Dobře vypálená slínková zrna mají kulovitý tvar, jsou sklovitá, pórovitá a křehká, s průměrem od několika milimetrů až do 3 cm. Při následném mletí jsou přidávány další přísady s hydraulickými nebo pucolánovými vlastnostmi (struska, popílký) [17].

3.4.2 Cement směsný CEM V/A (S-V) 32,5 R

Tento cement se vyznačuje rychlým nárůstem počáteční pevnosti a především dobrou odolností proti agresivnímu prostředí. Proto se hodí v silničním stavitelství jako pojivo při studených recyklaci konstrukčních vrstev vozovek.

Složení [18]:

- | | |
|-----------------------|-------------|
| • Slínek | (40 – 60) % |
| • Vysokopecní struska | (18 – 30) % |
| • Pucolány – přírodní | (18 – 30) % |
| • Popílek – přírodní | (18 – 30) % |
| • Dolplňující složky | (0 – 5) % |

Vlastnosti [18]:

- | | |
|-----------------------------------|--------------------|
| • Počáteční pevnost v tlaku | ≥ 10,0 MPa (2 dny) |
| • Normalizovaná pevnost v tlaku | (32,5 – 52,5) MPa |
| • Počátek tuhnutí | ≥ 75 min. |
| • Obsah síranů (SO ₃) | ≤ 4,0 % hm. |
| • Obsah chloridů | ≤ 0,1 % hm. |

Pozn.: Tento cement byl použit v praktické části práce.

3.5 REGENERAČNÍ PŘÍSADY

3.5.1 Stárnutí asfaltového pojiva

Asfalt je směs vysoce molekulárních uhlovodíků, která vykazuje visko-elastické vlastnosti měnící se s teplotou. Chemické složky asfaltu jsou: asfalteny, malteny, parafíny, lehké a těžké aromáty s vysokým oktanovým číslem. Asfalteny jsou tvrdé, křehké a nerozpustné komponenty, nepodléhající oxidaci. Malteny (pryskyřice a oleje) jsou v parafinických rozpouštědlech rozpustné a na rozdíl od asfaltenů podléhají oxidaci ovlivňující tuhost pojiva. Asfaltové pojivo tedy podléhá stárnutí. Při stárnutí probíhají chemické i fyzikální změny ve složení asfaltu. Z hlediska času je možné rozdělit stárnutí na krátkodobé a dlouhodobé. Ke krátkodobému stárnutí asfaltu dochází již při výrobě, dopravě a pokládce asfaltové směsi. Dlouhodobé stárnutí je způsobeno vzduchem, který se k pojivu dostává na povrchu asfaltové vrstvy a také mezerami mezi asfaltem obalenými zrna kameniva. Oxidací maltenů dochází ke změně poměru mezi asfalteny a malteny a to ovlivňuje tuhost pojiva [17].

Laboratorní simulace stárnutí asfaltového pojiva – metoda PAV

Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (Pressurized Aging Vessel – PAV). Nepohybující se vrstva pojiva o tloušťce 3,2 mm je umístěna v miskách do tlakové nádoby, předehřáté na teplotu (85 °C, 90°C, 100°C nebo 110 °C). Nádoba s tlakem vzduchu 2,1 MPa se nechá při předepsané teplotě uzavřená po dobu 20 hodin (pro pojiva získaná z asfaltové emulze 65 hodin). Vliv stárnutí na asfaltová pojiva je dán změnou vlastností pojiva určeným před a po zkoušce stárnutí [17].



Obr. 3.19 - Pressurized Aging Vessel - PAV [21]

3.5.2 Rejuvenátory

Rejuvenátory, potažmo omlazovače, jsou určeny k rejuvenaci zestárých asfaltových pojiv v R-materiálu. Obecně jsou pro tento účel používány fluxační oleje na minerální nebo rostlinné bázi. Tyto oleje napomáhají k získání rovnováhy mezi asfalteny a malteny v zestárlém pojivu. Díky tomu dochází k omlazení zoxidovaného asfaltového pojiva v R-materiálu. Rejuvenátory by měly obsahovat vysoký podíl aromatických látek nezbytných pro rozptýlení asfaltenů, nízký podíl nasycených mastných kyselin, které jsou neslučitelné s asfaltem. Zároveň musí obsahovat malteny pro zlepšení poměru mezi asfalteny a malteny v zestárlém asfaltovém pojivu. [25]

Paramo Reju 553

Jedná se o střední olejový destilát z ropy, odparafinovaný a selektivně rafinovaný.

Vlastnosti:

- | | |
|---|------------------------|
| • Obsah účinné složky | 100 % |
| • Hustota při 15 °C | 905 kg·m ⁻³ |
| • Kinematická viskozita složky při 40 °C | 150 mm ² /s |
| • Kinematická viskozita složky při 100 °C | 13 mm ² /s |
| • Bod tekutosti | -6 °C |
| • Obsah aromatického uhlíku | 9 % |

Paramo Reju 182

Tento rejuvenátor obsahuje rostlinný řepkový olej.

Vlastnosti:

• Obsah účinné složky	100 %
• Hustota při 15 °C	920 kg·m ⁻³
• Kinematická viskozita složky při 40 °C	34 mm ² /s
• Kinematická viskozita složky při 100 °C	-
• Bod tekutosti	-
• Obsah aromatického uhlíku	0 %

Paramo Reju 161

Jedná se o 60 % emulzi mírně rafinovaného minerálního oleje.

Vlastnosti:

• Obsah účinné složky	min. 50 %
• Hustota při 15 °C	922 kg·m ⁻³
• Kinematická viskozita složky při 40 °C	210 mm ² /s
• Kinematická viskozita složky při 100 °C	15,5 mm ² /s
• Bod tekutosti	-6 °C
• Obsah aromatického uhlíku	15 %



Obr. 3.20 - Paramo Reju 553, Paramo Reju 182, Paramo Reju 161

Pozn.: Tyto rejuvenátory byly použity v praktické části práce. Informace o nich poskytl vedoucí vývoje paliv a asfaltů Paramo Pardubice pan Ing. Jiří Plitz.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části práce je snahou najít vhodnou recepturu studené asfaltové směsi pro podkladní vrstvy málo zatížených vozovek, s použitím technologie recyklace za studena v míchacím centru. První část praktické části je věnována průkazným zkouškám R-materiálu. Dále jsou zde uvedeny receptury navržených směsí, postup výroby studených asfaltových směsí a zkušebních těles. Následně se praktická část práce věnuje průkazným zkouškám navržených směsí. Návrh receptur směsí stmelených asfaltovou emulzí, kombinací asfaltové emulze a cementu vychází z technických podmínek TP 208. Dále byly navrženy směsi s regeneračními přísadami (rejuvenátory), pro vyzkoušení vhodnosti použití těchto přísad do studených asfaltových směsí. Poslední část práce je zaměřena na experimentální měření vybraných směsí. Při experimentálním měření jsou získány doplňující charakteristiky vybraných směsí. V praktické části je použit R-materiál frakce 0/16 mm z Jihomoravské obalovny s.r.o. v Rajhradcích, dále výrobky (asfaltová emulze a rejuvenátory) firmy PARAMO a.s. (skupina Unipetrol a.s.). Dále byl do studených asfaltových směsí použit směsný cement.

4.1 PRŮKAZNÍ ZKOUŠKY R-MATERIÁLU

Použitý materiál v praktické části diplomové práce byl R-materiál frakce 0/16 mm (Rajhradice).

Pozn.: Označení **22 RA 0/16** dle ČSN EN 13108 – 8. Dále označován jako **R-mat 0/16**.



Obr. 4.1 - R-mat 0/16

R-materiál pochází z Jihomoravské obalovny, s.r.o. Rajhradice. Bližší informace (např. původ recyklátu a jeho stáří) o recyklátu nejsou k dispozici. Před použitím R-materiálu do studených asfaltových směsí je potřeba zjistit vlastnosti popsané v dalších kapitolách této práce.

Na R-materiálu byl proveden síťový rozbor, extrakce pojiva a síťový rozbor kameniva po extrakci pojiva. Na vyextrahovaném pojivu byla stanovena penetrace jehlou a bod měknutí. Dále byla stanovena maximální objemová hmotnost a zhutnitelnost R-materiálu. Zhutnitelnost byla zjišťována metodou Proctor modifikovaný, vibračním pěchem a lisováním.

4.1.1 Stanovení zrnitosti R-materiálu

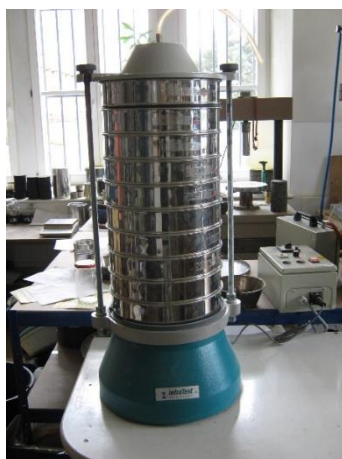
Zrnitost byla stanovena síťovým rozbořem podle ČSN EN 933 – 1 – Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor.

Podstata zkoušky

Zkouška se skládá z roztřídění a oddělení materiálu pomocí sady zkušebních sít do několika frakcí se sestupnou velikostí otvorů.

Zařízení a pomůcky

Zkušební síta s otvory uvedenými v EN 933-2; pevně lícující víko a dno sady zkušebních sít; sušárna s nucenou cirkulací vzduchu s automatickým udržováním a kontrolou teploty; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zkušební navážky; nádoby, kartáče; štětce; prosévací přístroj.



Obr. 4.2 - Prosévací přístroj

Postup

Ze zkušební navážky o hmotnosti 2,6 kg byly odebrány dva referenční vzorky R-materiálu, každý o hmotnosti cca 1 kg. Referenční vzorky byly v sušárně vysušeny do ustálené hmotnosti při teplotě $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Po vychladnutí vzorků bylo provedeno prosévání. Nejprve byl materiál nasypán na předem připravená síta. Horní síto s velikostí otvorů 16 mm bylo utěsněno víkem. V první fázi byl materiál proséván mechanicky po dobu 1 minuty. Mechanické prosévání bylo doplněno ručním prosetím pro zajištění vyšší přesnosti. Následně byla zjištěna hmotnost zůstatků materiálu na jednotlivých sítích s přesností na 0,1 g. Tento postup byl opakován i pro druhý vzorek recyklátu.

Pozn.: Proces propírání materiálu byl vynechán. Propírání je nutné u jemnozrnných zemin, pro zajištění přesnosti v dolní části křivky zrnitosti. Teplota sušení byla snížena na $60 ^\circ\text{C}$ z důvodu přítomnosti zbytkového asfaltu v R-materiálu, aby vlivem vysoké teploty nedocházelo ke změně struktury zrn v R-materiálu.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byla vyhodnocena křivka zrnitosti a obsah jemných částic.

Rovnice 1 - Procento zůstatku materiálu

$$p_i = \frac{R_i}{M_1} \cdot 100 \%$$

kde p_i procento zůstatku materiálu na jednotlivém sítu [%]

R_i hmotnost zůstatku materiálu na jednotlivém sítu [g]

M_1 celková vysušená hmotnost referenčního vzorku [g]

Rovnice 2 - Součtové procento propadu

$$P_i = 100 - p_i$$

kde P_i součtové procento propadu na jednotlivém sítu [%]

p_i procento zůstatku materiálu na jednotlivém sítu [%]

Rovnice 3 - Obsah jemných částic

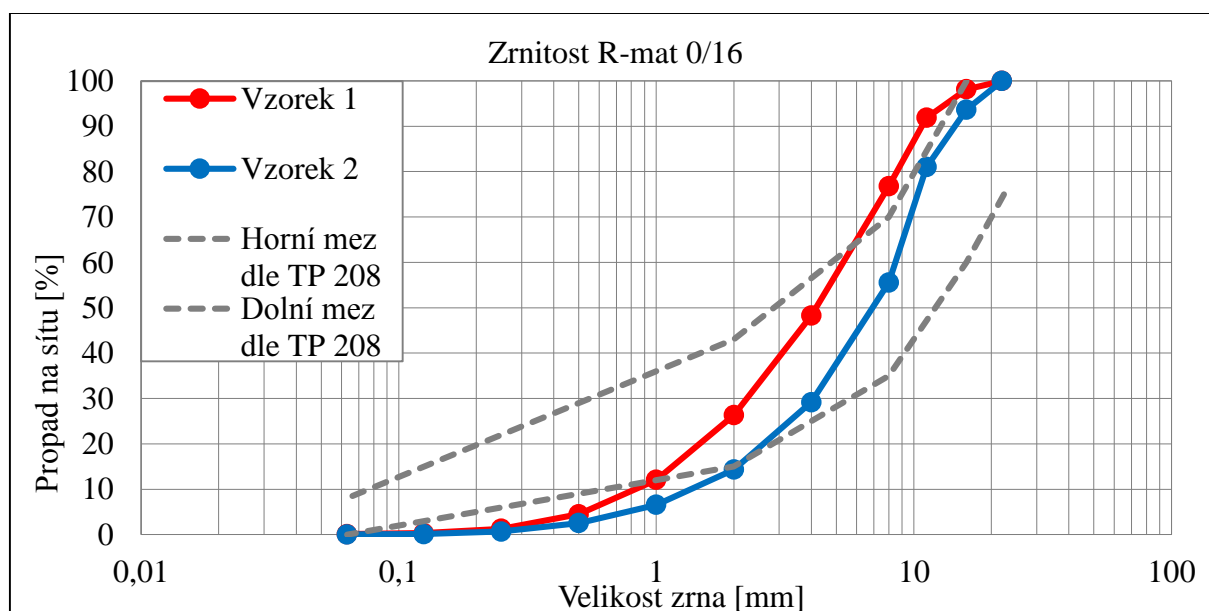
$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \cdot 100 \%$$

kde f obsah částic menších než 0,063 mm [%]

M_1 celková vysušená hmotnost referenčního vzorku [g]

M_2 celková vysušená hmotnost referenčního vzorku po vyprání [g]

M_2 hmotnost vysušeného materiálu na dně sady zkušebních sít [g]



Graf 4.1 - Zrnitost R-materiálu

Průměrný obsah jemných částic $f = 0,1 \%$.

Pozn.: Křivky zrnitosti leží v mezích dle TP 208 v 73,3 % hm. Meze jsou pouze doporučené, a proto není nutné zrnitost recyklátu nijak upravovat. Podrobný protokol viz příloha A.

4.1.2 Extrakce pojiva z R-materiálu

Extrakce pojiva byla provedena podle ČSN EN 12697 – 1 – Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpuštěného pojiva.

Podstata zkoušky

Cílem této zkoušky je oddělit zbytkové asfaltové pojivo z R-materiálu a získat tak čisté kamenivo z původní asfaltové směsi. K oddělování asfaltového pojiva od kameniva je používáno chemické rozpouštědlo. Výsledkem zkoušky je zjištěný obsah asfaltového pojiva v R-materiálu a následné stanovení zrnitosti kameniva.

Zařízení a pomůcky

Přístroj na extrakci pojiva; rozpouštědlo (Trichloretylen); patrona k oddělení fileru z roztoku pojiva; filtrační papír; zkušební síta s otvory uvedenými v EN 933-2; pevně lícující víko a dno sady zkušebních sít; sušárna s nucenou cirkulací vzduchu s automatickým udržováním a kontrolou teploty; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zkušební navážky; nádoby; kartáče; štětce.



Obr. 4.3 - Přístroj na extrakci pojiva

Postup

Vysušená navážka R-materiálu o přesné hmotnosti 1 kg byla umístěna do nádoby s rozpouštědlem (Trichlorethylenem), kde se nechala 24 hodin louhovat. Byla zjištěna hmotnost patrony s papírovým filtrem pro zachytávání fileru. Patrona byla následně umístěna do přístroje na extrakci, přístroj byl uzavřen poklopem s otvorem, do kterého je zaústěna nálevka. Nad nálevku byla umístěna sada dvou sít, spodní s velikostí ok 0,063 mm, vrchní s velikostí ok 2 mm. Na síta bylo nalito rozpouštědlo z nádoby a nasypán vylouhovaný R-materiál. Začalo propírání materiálu čistým rozpouštědlem. Rozpouštědlo oddělovalo zbytkový asfalt od kameniva. Směs rozpouštědla, asfaltu a fileru protékala síty přes nálevku do roztočeného bubnu. V roztočeném bubnu byl zachytáván filer a asfalt s rozpouštědlem odtékal pryč. Zhruba po 30 minutách, kdy do nálevky protékalo čisté rozpouštědlo, byla extrakce ukončena. Byla zjištěna hmotnost patrony se zachyceným filerem. Rozdílem hmotností patron byla vypočítána hmotnost fileru. Kamenivo zbylé na sítích bylo vysušeno při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Byla zjištěna hmotnost vysušeného a vychladlého kameniva, k této hmotnosti byla připočtena hmotnost fileru a následně bylo stanoveno procentuální zastoupení zbytkového asfaltu v R-materiálu. Dále byl na kamenivu proveden síťový rozbor. Tento postup byl opakován i pro druhý vzorek recyklátu.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byl podle následující rovnice vypočítán obsah zbytkového pojiva. Výsledek zkoušky je zaznamenaný v tabulce.

Rovnice 4 - Obsah zbytkového pojiva

$$S = \frac{(m - m_1)}{m} \cdot 100 \%$$

kde S obsah zbytkového pojiva [%]
m hmotnost zkušební vzorku [g]
m₁ hmotnost kameniva a fileru [g]

Tab. 4.1 - Extrakce pojiva z R-materiálu

Označení patrony	Hmotnost patrony	Hmotnost patrony a fileru	Hmotnost fileru	Hmotnost kameniva a fileru	Obsah pojiva	Průměrný obsah pojiva
[-]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
1	433,1	502,7	69,6	946,6	5,3	5,4
2	432,5	508,4	75,9	945,7	5,4	

4.1.3 Stanovení zrnitosti kameniva v R-materiálu po extrakci pojiva

Zrnitost byla stanovena síťovým rozbořem podle ČSN EN 933 – 1 – Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor.

Podstata zkoušky

Stejná jako v kapitole 4.1.1.

Zařízení a pomůcky

Stejně jako v kapitole 4.1.1.

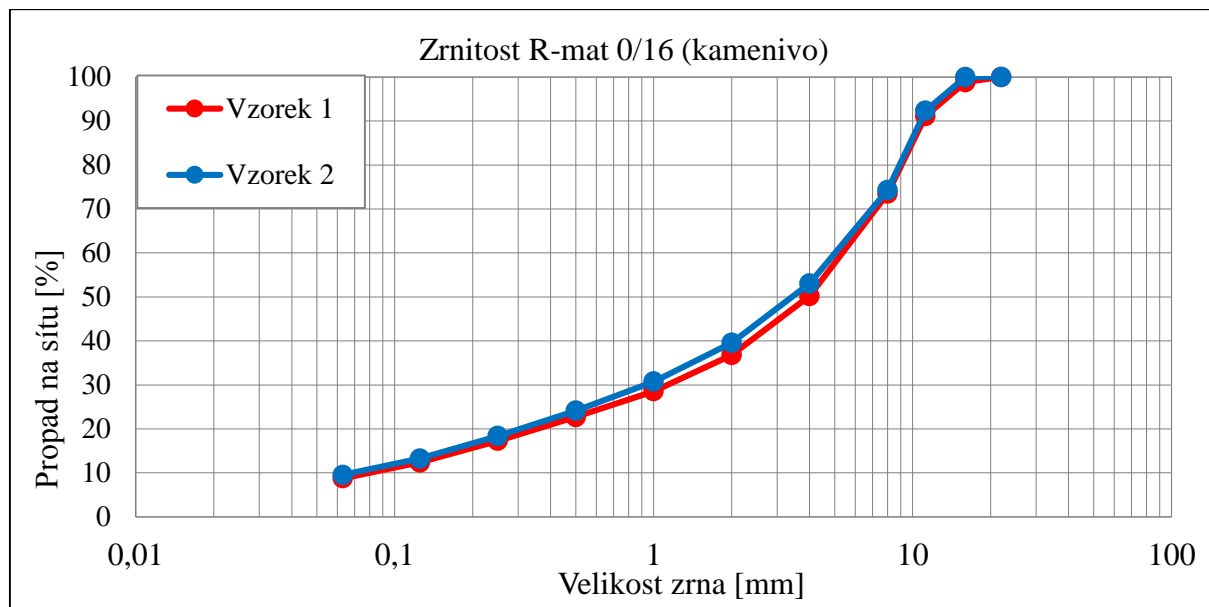
Postup

Postup pro stanovení zrnitosti kameniva, získaného po extrakci pojiva, byl stejný jako při stanovení zrnitosti R-materiálu. Pouze k hmotnosti materiálu propadlého sítím s velikostí ok 0,063 mm byla přičtena hmotnost fileru, získaného při extrakci pojiva.

Pozn.: Sušení kameniva probíhalo při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byla vyhodnocena křivka zrnitosti a obsah jemných částic stejným způsobem jako v kapitole 4.1.1.



Graf 4.2 - Zrnitost R-materiálu (kamenivo)

Průměrný obsah jemných částic $f = 9,2 \%$.

Pozn.: Ze síťového rozboru je patrné, že křivky zrnitosti obou vzorků jsou téměř identické. To naznačuje, že při výrobě R-materiálu nedocházelo k drcení zrn kameniva a použitý R-materiál je homogenní a pravděpodobně je získaný ze stejné asfaltové směsi pro ložné nebo podkladní vrstvy. Podrobný protokol viz příloha B.

4.1.4 Znovuzískání extrahovaného pojiva z R-materiálu

Znovuzískání extrahovaného pojiva z R-materiálu bylo provedeno podle ČSN EN 12697 – 3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.

Podstata zkoušky

Cílem této zkoušky je oddělit od roztoku asfaltového pojiva a rozpouštědla (získání roztoku viz kapitola 4.1.2.) rozpouštědlo a na odděleném asfaltovém pojivu provádět další zkoušky.

Zařízení a pomůcky

Rotační vakuové destilační zařízení; skleněná nádoba; vazelína.



Obr. 4.4 - Destilační zařízení

Postup

Před samotnou zkouškou bylo nutné provést kontrolu těsnosti destilačního zařízení. Z přístroje byl pomocí kompresoru odsáván vzduch do hodnoty podtlaku (100 ± 5) kPa. Po dosažení této hodnoty, bylo odsávání zastaveno a zároveň byl sledován tlakoměr. Pro zajištění těsnosti bylo nutné zábrusové spoje hrdel skleněné nádoby a destilačního zařízení natřít tenkou vrstvou vazelíny. Po kontrole těsnosti bylo zapnuto znovu odsávání vzduchu na hodnotu (40 ± 5) kPa, také bylo zapnuto ohřívání olejové lázně na počáteční teplotu (90 ± 5) °C. Společně s ohřevem olejové lázně bylo spuštěno vodní chlazení destilačního zařízení. Při zahřívání lázně byla zapnuta také rotace (75 ± 15) ot/min skleněné nádoby s kulatým dnem. Rotující nádoba byla pomalu ponořena do olejové lázně a po dosažení počáteční teploty začalo nasávání roztoku rozpouštědla a asfaltu do rotující nádoby. Olejová lázeň zahřívala nasátý roztok a vlivem teploty bylo rozpouštědlo odpařováno a v nádobě zůstávalo čisté asfaltové pojivo. V době, kdy vydestilované rozpouštědlo přestalo kondenzovat a stékat do zachytivé nádoby, byla teplota olejové lázně zvýšena na (160 ± 5) °C a zvýšen podtlak vzduchu v destilačním zařízení na (100 ± 5) kPa, aby bylo zajištěno úplné oddělení rozpouštědla a asfaltového pojiva. Destilace probíhala do doby, kdy bylo veškeré rozpouštědlo odpařeno, a v asfaltu přestaly vznikat bubliny. Po ukončení destilace byla zastavena rotace, vypnut ohřev lázně a zastaveno vodní chlazení. Následně byl vyrovnán tlak ve vakuovém destilačním zařízení a byla vyjmuta nádoba s čistým asfaltem, který byl použit pro další zkoušení (stanovení penetrace jehlou a bodu měknutí).

4.1.5 Stanovení penetrace jehlou na extrahovaném pojivu

Stanovení penetrace jehlou bylo provedeno podle ČSN EN 1426 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.

Podstata zkoušky

Podstatou zkoušky je stanovit hloubku průniku penetrační jehly do vzorku asfaltu a zjistit tak tvrdost asfaltového pojiva.

Zařízení a pomůcky

Penetrometr; penetrační jehla (průměr 1,00 – 1,02 mm, délka 50 mm); nádoba na zkušební vzorek asfaltu (vnitřní průměr 55 – 70 mm); vodní lázeň udržující teplotu v okolí vzorku v rozmezí $\pm 0,2$ °C; stopky s přesností 0,1 s; teploměr.



Obr. 4.5 - Penetrometr

Postup

Asfaltové pojivo získané postupem popsáním v kapitole 4.1.4 bylo nalito do penetrační nádoby. Vzorek asfaltu byl po vychladnutí s penetrační nádobou umístěn do vodní lázně, kde se nechal 60 – 90 minut temperovat na teplotu 25 °C. Nádoba, s vodní lázní a asfaltovým pojivem nalitým v penetrační nádobě, byla umístěna do penetrometru. Rozpouštědlem očištěná penetrační jehla byla spuštěna, tak aby se přesně dotýkala povrchu asfaltu v penetrační nádobě. Poté byla jehla se závažím o hmotnosti 100 g uvolněna po dobu 5 vteřin. Následně byla změřena hloubka průniku penetrační jehly do vzorku asfaltového pojiva. Byly provedeny 3 vpichy min. 10 mm od sebe.

Vyhodnocení

Tab. 4.2 - Penetrace jehlou

Označení vzorku	Penetrace jehlou		Průměrná penetrace jehlou	
	[mm]	[p.j.]	[mm]	[p.j.]
1	1,78	17,8	1,8	18
	1,75	17,5		
	1,75	17,5		

Pozn.: Z naměřených výsledků je patrné, že zbytkové asfaltové pojivo z R-materiálu je velice zestárlé a tvrdé. Běžně používané silniční asfalty mají penetraci 50/70.

4.1.6 Stanovení bodu měknutí na extrahovaném pojivu

Stanovení bodu měknutí bylo provedeno podle ČSN EN 1427 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička.

Podstata zkoušky

Podstatou zkoušky je stanovit teplotu, při které asfalt změkne natolik, aby se kuličky z něho vyrobené protáhly mosaznými kroužky do předepsané vzdálenosti ($25,0 \pm 0,4$) mm.

Zařízení a pomůcky

Odlévací destička; mosazné kroužky (vnitřní průměr $19,8 \pm 0,1$ mm); nerezové kuličky (průměr $9,50 \pm 0,05$ mm, hmotnost $3,50 \pm 0,05$ g); držák kroužků; skleněná kádinka; destilovaná voda; teploměr; magnetické míchadlo; automatické zkušební zařízení; špachtle.



Obr. 4.6 - Metoda kroužek a kulička

Postup

Asfaltové pojivo získané postupem popsaným v kapitole 4.1.4 bylo nalito do připravených kroužků na odlévací destičce s mírným přebytkem. Pojivo v kroužcích chladlo po dobu 30 minut, poté byl přebytek pojiva nahřátou špachtlí oříznut s horní hranou kroužků. Kroužky byly umístěny do držáku, který byl vložen do nádoby s destilovanou vodou, tak aby hladina destilované vody byla nad horním okrajem kroužků. Počáteční teplota vodní lázně byla (5 ± 1) °C. Po temperaci na předepsanou teplotu byly do držáku nad kroužky umístěny kuličky. Poté byl spuštěn ohřev a míchání vody. Teplota vodní lázně rostla rovnoměrně rychlostí 5 °C/min. Vlivem teploty asfalt měknul a kuličky jím propadaly. V době, kdy klesly obě kuličky obalené asfaltem o $(25 \pm 0,4)$ mm pod úroveň kroužků, byla zkouška pozastavena. Zkušební zařízení zaznamenalo teplotu vodní lázně při těchto poklesech.

Vyhodnocení

Tab. 4.3 - Bod měknutí

Označení vzorku	Bod měknutí	Průměr bodu měknutí
[-]	[°C]	[°C]
1	64,7	64,6
	64,4	

Pozn.: Tato zkouška potvrdila, že zbytkové pojivo v R-materiálu je velice zestárlé. Silniční asfalt 50/70 má bod měknutí cca (46 – 54) °C.

4.1.7 Stanovení maximální objemové hmotnosti R-materiálu

Stanovení maximální objemové hmotnosti bylo provedeno podle ČSN EN 12697 – 5 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti.

Postup A: Volumetrický postup

Podstata zkoušky

Podstata této zkoušky je zjistit objemovou hmotnost materiálu bez vody a bez mezer. Výsledek této zkoušky slouží pro stanovení mezerovitosti materiálu.

Zařízení a pomůcky

Sušárna s nucenou cirkulací vzduchu s automatickým udržováním a kontrolou teploty; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zkušební navážky; teploměr s přesností $\pm 0,1$ °C; vodní lázeň udržující teplotu v okolí vzorku v rozmezí $\pm 0,2$ °C; pyknometr; vývěva umožňující vytěsnění vzduchu z pyknometru na zbytkový tlak 4 kPa; destilovaná voda.



Obr. 4.7 - Pyknometr



Obr. 4.8 - Vývěva

Postup

Vysušená zkušební navážka při teplotě (60 ± 5) °C do ustálené hmotnosti byla rozmělněna na drobné částice. Z laboratorních tabulek pro pyknometry byla zjištěna hmotnost pyknometru s nástavcem (m_1) a objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce. Vysušený materiál byl nasypán do pyknometru a byla zjištěna hmotnost pyknometru, nástavce a materiálu (m_2). Následovalo naplnění pyknometru destilovanou vodou maximálně do výšky 30 mm pod okraj. Pyknometrem bylo opatrně zatřeseno tak, aby došlo k uvolnění vzduchových bublin. Dále byl pyknometr vložen do vývěvy, kde po dobu (15 ± 1) minuty docházelo při podtlaku 4 kPa k uvolňování zbývajících vzduchových bublin. V době odsávání bylo vývěvou třeseno tak, aby se urychlilo uvolňování bublin. Poté byl nasazen nástavec pyknometru, doplněna destilovaná voda po referenční značce a pyknometr s nástavcem, materiálem a destilovanou vodou byl vložen do vodní lázně. Temperování ve vodní lázni bylo prováděno při $(25 \pm 1,0)$ °C. V době, kdy destilovaná voda v pyknometru měla stejnou teplotu jako vodní lázeň, tedy $(25 \pm 1,0)$ °C, byl pyknometr z vodní lázně vyjmut. Ihned po osušení pyknometru byla stanovena hmotnost (m_3).

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byla podle následující rovnice vypočítána maximální objemová hmotnost. Výsledek zkoušky je zaznamenaný v tabulce.

Rovnice 5 - Maximální objemová hmotnost

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \cdot \left(V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)}$$

kde ρ_{mv} maximální objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 m_1 hmotnost pyknometru a nástavce [g]
 m_2 hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku [g]
 m_3 hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody [g]
 V_p objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce [m^3]
 ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Tab. 4.4 - Maximální objemová hmotnost R-materiálu

Pyknometr	V_p	m_1	m_2	m_3	t	ρ_w	ρ_{mv}
[-]	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[$^{\circ}\text{C}$]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
V	1 323,0	693,0	1 965,1	2 778,5	25,0	997,1	2 508

Pozn.: Maximální objemová hmotnost se běžně stanovuje u směsí. Hodnota maximální objemové hmotnosti R-materiálu slouží pouze pro zjištění orientační mezerovitosti experimentálně navržených směsí. Tyto směsi jsou popsány v následujících kapitolách praktické části práce. V praxi by znamenalo, stanovit maximální objemovou hmotnost každé směsi zvlášť a to nejméně ze dvou měření.

4.1.8 Stanovení zhutnitelnosti R-materiálu

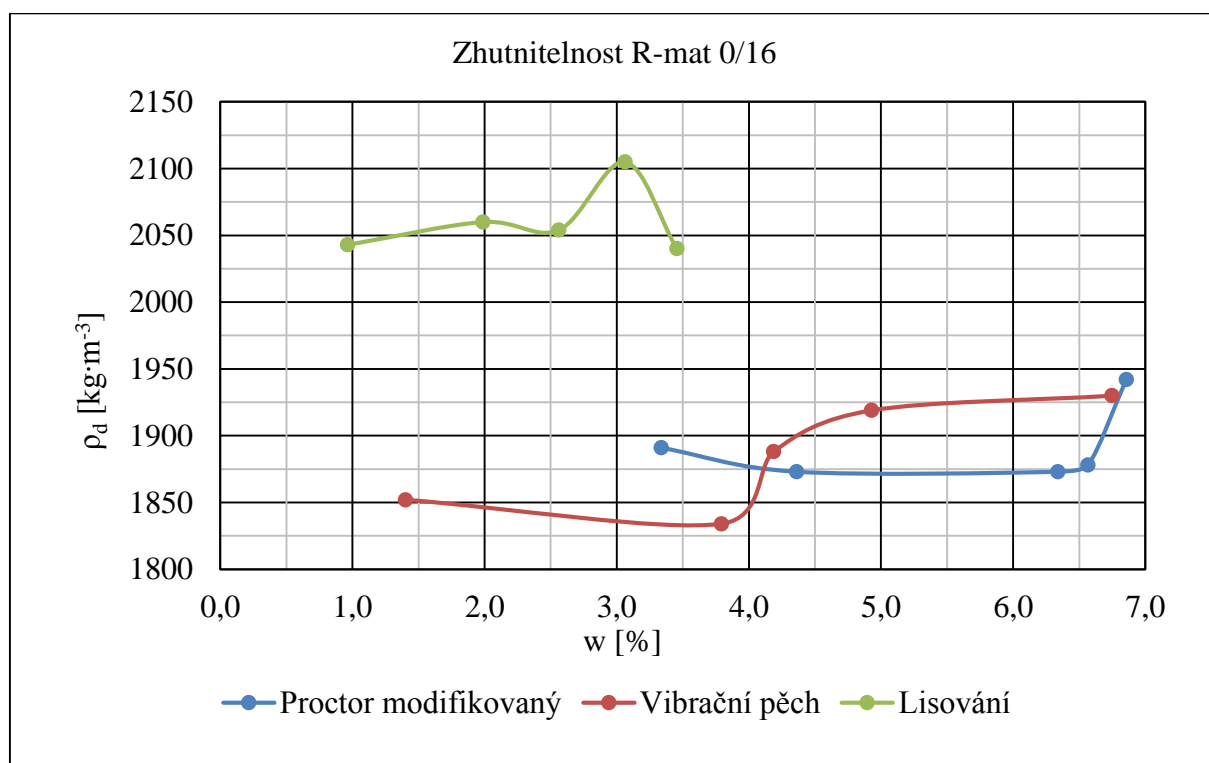
Zhutnitelnost R-materiálu byla provedena metodou Proctor modifikovaný, vibračním pěchem a lisováním. Při zjišťování zhutnitelnosti se ukázalo, že rázové a vibrační metody nejsou vhodné pro hrubozrnné materiály. Zhutnitelnost R-materiálu byla tedy stanovena lisováním, přestože Technické podmínky TP 208 uvádí metodu Proctor modifikovaný jako doporučenou.

Zhutnitelnost R-mat 0/16 (lisování):

Maximální suchá objemová hmotnost zhutněného materiálu, $\rho_d = 2\,100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Optimální vlhkost, $w_{\text{opt}} = 3,0 \%$

Pozn.: Výsledky jednotlivých metod jsou zobrazeny v následujícím grafu.



Graf 4.3 - Zhutnitelnost R-materiálu

Pozn.: Použité metody pro zjištění zhutnitelnosti jsou popsány v následujících kapitolách.

4.1.9 Zhutnitelnost - Proctor modifikovaný

Stanovení zhutnitelnosti bylo provedeno podle ČSN EN 13286 – 2 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška.

Modifikovaná Proctorova zkouška pro směsi hutněné pěchem o hmotnosti 4,5 kg (B) v Proctorově formě (A).

Podstata zkoušky

Podstatou této zkoušky je zjistit maximální objemovou hmotnost suchého materiálu (ρ_d) při optimální vlhkosti materiálu (w_{opt}). Navážka zkoušeného materiálu je rozdělena na několik vzorků, do každého je přidáno různé množství vody. Materiál je pomocí rázového zatížení hutněn do formy. Poté je vypočítána suchá objemová hmotnost a vlhkost materiálu. Tyto hodnoty jsou vyneseny do grafu (křivka vnesených hodnot má mít parabolický tvar), ze kterého je odečtena maximální hodnota suché objemové hmotnosti při dané vlhkosti. Tato vlhkost je považována za optimální, tedy za takovou, při které je materiál zhutněn na maximální míru.

Zařízení a pomůcky

Proctorova forma A (výška $h_1 = 120$ mm, průměr $d_1 = 100$ mm); hutnicí pěch B (hmotnost $m_R = 4,50 \pm 0,04$ kg, průměr základu $d_2 = 50,0 \pm 0,5$ kg); hutnicí zařízení; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zhutněného vzorku; mísící nádoba; odměrný válec; sušárna s nucenou cirkulací vzduchu s automatickým udržováním a kontrolou teploty; váženky; špachtle; urovnávací pravítko.



Obr. 4.9 - Proctor modifikovaný



Obr. 4.10 - Problém při hutnění

Postup

Před začátkem zkoušky byla zjištěna hmotnost Proctorovy formy se základní deskou (m_1). Vysušená navážka R-materiálu byla rozdělena na 5 částí. Každá část o hmotnosti cca 2,2 kg byla smíchána s různým množstvím vody. Navlhčený materiál byl postupně vsypáván do Proctorovy formy a pomocí hutnicího zařízení byl hutněn. Hutnění probíhalo v 5 vrstvách 25 úderů. Výška dopadu hutnicího pěchu byla (457 ± 3) mm. Po skončení hutnění byl materiál zarovnan s horním okrajem formy. Byla zjištěna hmotnost formy, základní desky a materiálu (m_2). Následovalo odebrání dvou vzorků materiálu přibližně z prostřední části formy do předem zvážených váženek. Byla zjištěna hmotnost vlhkého materiálu (m_w). Po vysušení do ustálené hmotnosti při (110 ± 5) °C byla zjištěna hmotnost vysušeného materiálu (m_d). Tento postup byl opakován pro další 4 části zkušební navážky.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byly vypočítány suché objemové hmotnosti (ρ_d) a vlhkosti (w). Hodnoty byly vyneseny do grafu. Podrobný protokol viz příloha C.

Rovnice 6 - Objemová hmotnost vlhkého materiálu

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 1\,000$$

kde ρ objemová hmotnost vlhkého materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 m_1 hmotnost formy a základní desky [g]
 m_2 hmotnost formy, základní desky a zhutněného materiálu [g]
 V objem formy [m^3]

Rovnice 7 - Vlhkost vzorku

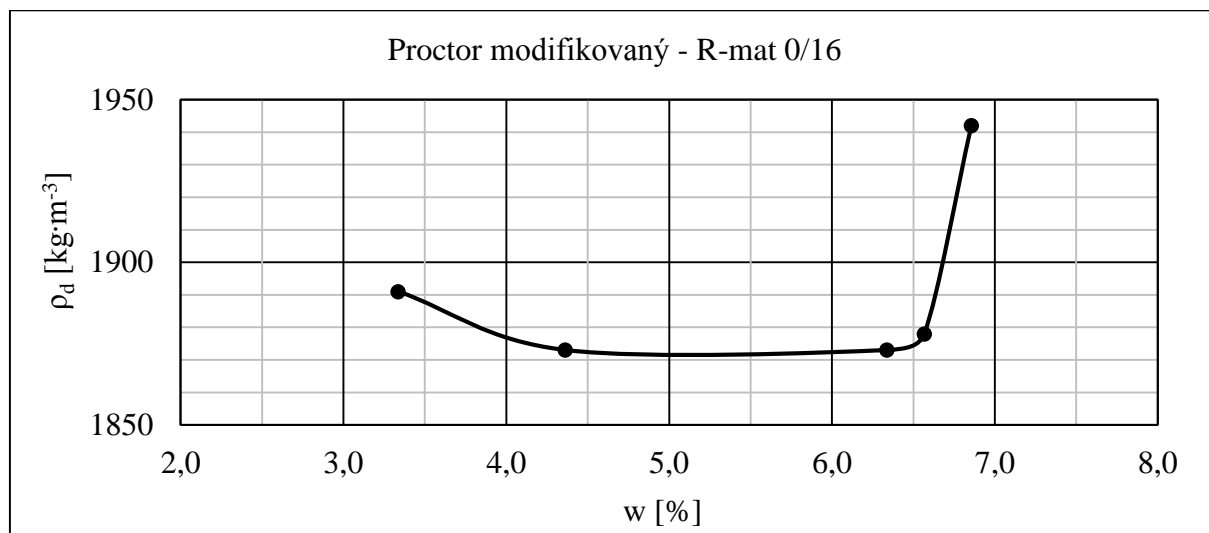
$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100\%$$

kde w vlhkost vzorku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 m_d hmotnost suchého materiálu [g]
 m_w hmotnost vlhkého materiálu [g]

Rovnice 8 - Objemová hmotnost zhutněného suchého materiálu

$$\rho_d = \frac{\rho}{(w + 100)} \cdot 100\%$$

kde ρ_d objemová hmotnost zhutněného suchého materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 w vlhkost vzorku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]



Graf 4.4 - Zhutnitelnost R-materiálu - Proctor modifikovaný

Pozn.: Z naměřených hodnot a výsledného grafu je patrné, že tato metoda není vhodná pro hrubozrnný materiál, kterým R-materiál je. Rázové hutnění způsobuje rozvolňování jednotlivých zrn a přebytečná voda z něj tak vytéká (viz obr. 4.10). Při hutnění více navlhčených vzorků dokonce voda vytékala i z Proctorovy formy.

4.1.10 Zhutnitelnost – Vibrační pěk

Stanovení zhutnitelnosti bylo provedeno podle ČSN EN 13286 – 51 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 51: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí vibračního pěkhu.

Podstata zkoušky

Podstata zkoušky je stejná jako v kapitole 4.1.9, pouze je pro hutnění materiálu použit vibrační pěk.

Zařízení a pomůcky

Hutnicí forma (výška $h = 100$ mm, průměr $d = 100$ mm); elektrický vibrační pěk; ocelové dusadlo; lis na vytlačení materiálu z formy; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zhutněného vzorku; mísící nádoba; odměrný válec; váženky; sušárna s nucenou cirkulací vzduchu s automatickým udržováním a kontrolou teploty; špachtle, urovnávací pravítko.



Obr. 4.11 - Vibrační pěk

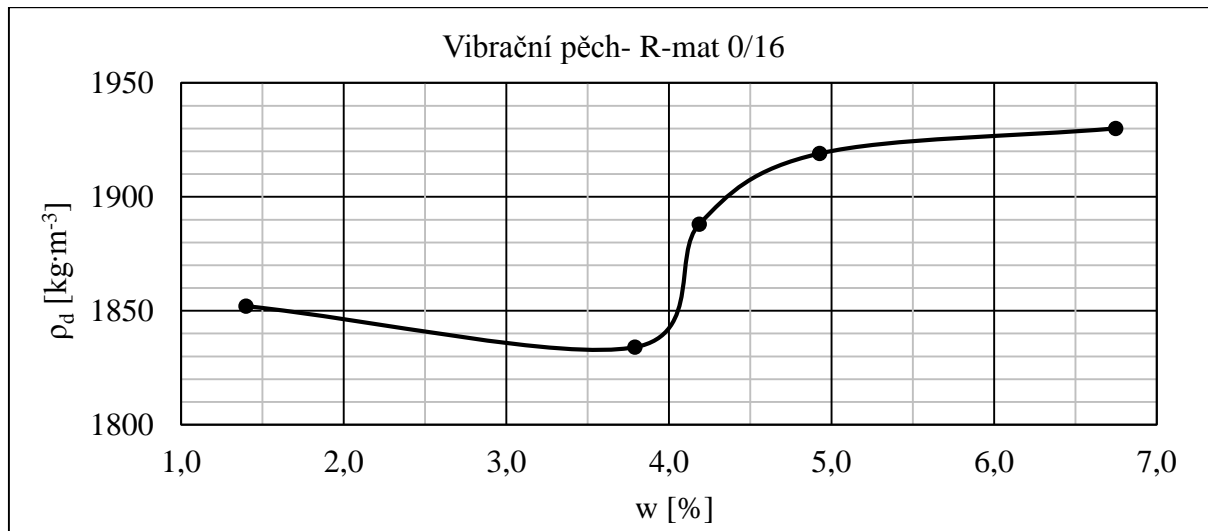
Postup

Před začátkem zkoušky byla zjištěna hmotnost formy se základní deskou (m_1). Vysušená navážka R-materiálu byla rozdělena na 5 částí. Každá část o hmotnosti cca 2 kg byla smíchána s různým množstvím vody. Navlhčený materiál byl postupně vsypán do hutnicí formy a pomocí vibračního pěkhu byl hutněn. Hutnění probíhalo ve 3 vrstvách. Každá vrstva byla hutněna po dobu 1 minuty se svislým přitlakem cca 300 – 400 N. Po skončení hutnění byl materiál zarovnán s horním okrajem formy. Byla zjištěna hmotnost formy, základní desky a materiálu (m_2). Následovalo odebrání dvou vzorků materiálu, přibližně z prostřední části formy, do předem zvážených váženek. Byla zjištěna hmotnost vlhkého materiálu (m_w). Po vysušení do ustálené hmotnosti při (110 ± 5) °C byla zjištěna hmotnost vysušeného materiálu (m_d). Tento postup byl opakován pro další 4 části zkušební navážky.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byly vypočítány suché objemové hmotnosti (ρ_d) a vlhkosti (w). Hodnoty byly vyneseny do grafu. Podrobný protokol viz příloha C.

Pozn.: Pro výpočet byly použity rovnice č. 6, 7 a 8.



Graf 4.5 - Zhutnitelnost R-materiálu - Vibrační pěch

Pozn.: Předpokládalo se, že přítlak, který byl vyvozen při hutnění, zajistí dobré zaklesávání jednotlivých zrn materiálu mezi sebe a tím nebude docházet k vytékání vody. Z naměřených hodnot a výsledného grafu je patrné, že i tato metoda není vhodná ke zjištění zhutnitelnosti R-materiálu.

4.1.11 Zhutnitelnost – Lisování

Stanovení zhutnitelnosti bylo provedeno podle ČSN EN 13286 – 53 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 53: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí osového tlaku.

Protože jde o směsi z R-materiálu, postup zkoušky byl upraven podle TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena – Příloha B. 2. 5: Výroba zkušebních těles pro stanovení pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě.

Podstata zkoušky

Podstata zkoušky je stejná jako v kapitole 4.1.9. Tato metoda se liší ve způsobu hutnění materiálu, hutnění probíhá bez rázů a vibrací. Při této zkoušce je materiál v hutnicí formě vystaven axiálnímu (osovému) tlaku.

Zařízení a pomůcky

Hutnicí forma (výška $h = 120$ mm, průměr $d = 100$ mm); hutnicí lis se schopností vyvolat dostatečnou sílu řízeným způsobem bez vibrace; lis na vytlačení materiálu z formy; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zhutněného vzorku; mísicí nádoba; odměrný válec; váženky; sušárna s nucenou cirkulací vzduchu s automatickým udržováním a kontrolou teploty; špachtle; urovnávací pravítko.



Obr. 4.12 - Hutnicí lis



Obr. 4.13 - Lis na vytlačení tělesa z formy

Postup

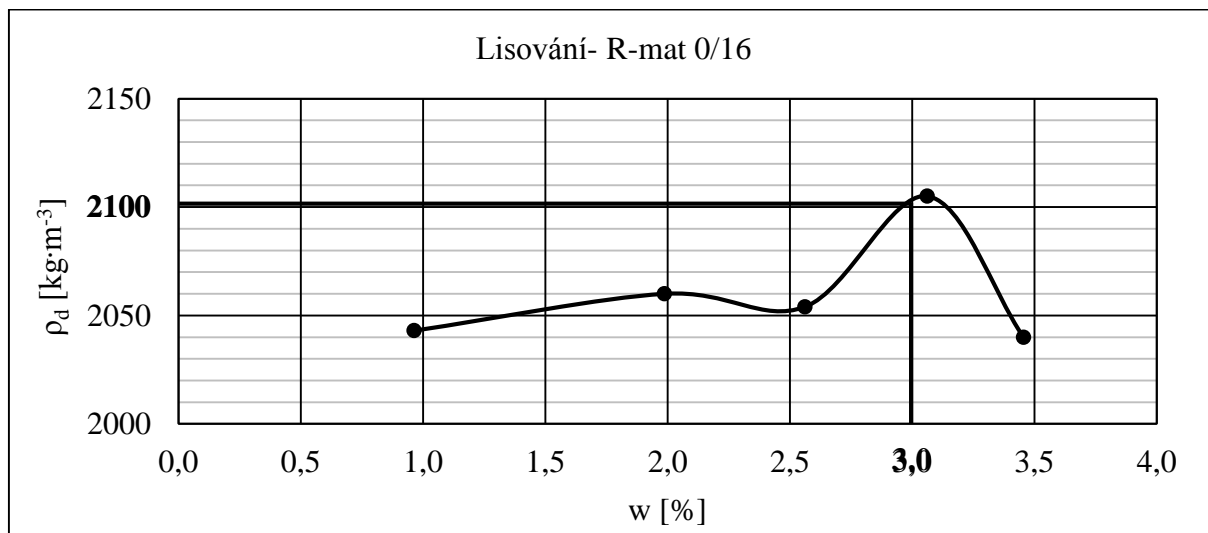
Před začátkem zkoušky byla zjištěna hmotnost formy se základní deskou (m_1). Vysušená navážka R-materiálu byla rozdělena na 5 částí. Každá část o hmotnosti cca 2 kg byla smíchána s různým množstvím vody. Navlhčený materiál byl postupně vsypáván do formy a propichován urovnávacím pravítkem. Poté byla forma s materiálem umístěna do lisu a začalo zatěžování osovou silou ($88,5 \pm 0,5$ kN). Vlivem dohutňování materiálu docházelo k poklesům napětí. Proto bylo hutnění prováděno v několika cyklech (obvykle 6 cyklů) až do doby, kdy bylo napětí ustáleno. Po skončení hutnění byl materiál vytlačen z formy. Následovalo odebrání dvou vzorků, přibližně z prostřední části tělesa, do předem zvážených váženek. Zjistila se hmotnost vlhkého materiálu (m_w). Po vysušení do ustálené hmotnosti při (110 ± 5) °C byla zjištěna hmotnost vysušeného materiálu (m_d). Tento postup byl opakován pro další 4 části zkušební navážky.

Pozn.: Jelikož byla zhutnitelnost prováděna na tělesech s výškou $h = 120$ mm a průměrem $d = 100$ mm bylo hutnění lisování prováděno pouze jedním pístem. Postup v TP 208 je popsán pro tělesa s výškou 200 mm, u kterých by jeden píst materiál dostatečně nezhutnil.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byly vypočítány suché objemové hmotnosti (ρ_d) a vlhkosti (w). Hodnoty byly vyneseny do grafu. Podrobný protokol viz příloha C.

Pozn.: Pro výpočet byly použity rovnice č. 6, 7 a 8.



Graf 4.6 - Zhutnitelnost R-materiálu - Lisování

Pozn.: Z tohoto grafu byly po zaokrouhlení odečteny následující hodnoty:

Maximální suchá objemová hmotnost zhutněného materiálu, $\rho_d = 2\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Optimální vlhkost, $w_{\text{opt}} = 3,0\%$

4.2 STUDENÉ ASFALTOVÉ SMĚSI

V této kapitole jsou uvedeny použité materiály a navržené směsi. Dále je popsána výroba směsí, výroba zkušebních těles a na závěr jsou zde popsány průkazní zkoušky studených asfaltových směsí. Poslední kapitola je věnována experimentálnímu měření vybraných studených asfaltových směsí. Před samotnou výrobou směsí, zkušebních těles a před samotným laboratorním zkoušením byla navržena matice (schéma) jednotlivých směsí. Podlé této matice byly vlastnosti jednotlivých směsí pomocí průkazních zkoušek ověřeny. V případě nesplnění některých klíčových kritérií (především pevnost v příčném tahu R_{it}) byly tyto nevhodné směsi, až na výjimky, vyřazeny. Základní rozdíl mezi jednotlivými směsmi byla teplota hutnění. Jedna sada zkušebních směsí byla hutněna při teplotě 20 °C, druhá sada byla hutněna při teplotě 60 °C. Jelikož jde o studené asfaltové směsi, jednalo se o maximální teplotu hutnění 60 °C. Do této matice byla zařazena tzv. referenční směs (v České republice již používána při studených recyklacích na místě). Tato směs má označení AEC2 a jedná se o směs stmelenu kombinací asfaltové emulze a cementu. V praktické části této práce slouží směs AEC2 pro porovnávání výsledků jednotlivých směsí.

4.2.1 Použité materiály

Kamenivo: R-materiál frakce 0/16 mm (Jihomoravská obalovna s.r.o. - Rajhradice)

Označení dle ČSN EN 13108-8: 22 RA 0/16

Pojivo: Asfaltová emulze Paramo KATEBIT C 65 B 3

Cement směsný CEM V/A (S-V) 32,5 R

Přísady: Paramo Reju 553, Paramo Reju 182, Paramo Reju 161

4.2.2 Přehled směsí

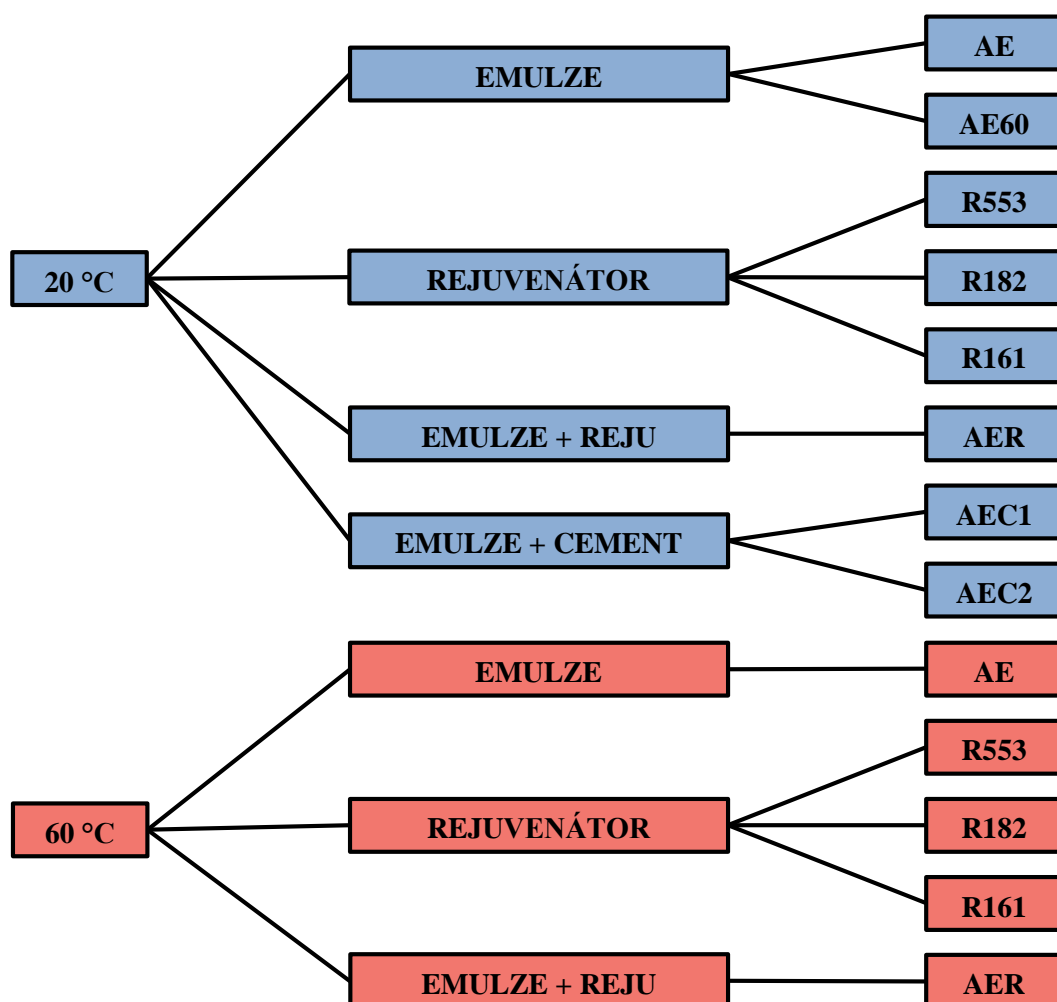
Pro každou směs bylo použito stejné kamenivo, tedy R-mat 0/16 (Rajhradice). R-materiál byl míchán s pojivy a přísadami dle receptur, které jsou uvedeny v následující tabulce. Množství asfaltové emulze bylo stanoveno na základě požadavku Technických podmínek TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena. Pro směsi s asfaltovou emulzí bylo dávkování emulze 1,25 % v množství zbytkového asfaltu v asfaltové emulzi. Asfaltová emulze Paramo KATEBIT C 65 B 3 obsahuje 65 % asfaltové emulze a 35 % vody. Tudíž bylo dávkování asfaltové emulze 2 % hm. Stejně dávkování přísad (2 % hm.) bylo použito u směsí s rejuvenátory. Stejně množství asfaltové emulze (2 % hm.) bylo použito i do směsí stmelenu kombinací asfaltové emulze a cementem.

Pozn.: TP 208 doporučují u směsí stmelenu asfaltovou emulzí a cementem dávkování asfaltové emulze 2 % v množství zbytkového asfaltu. To znamená 3,2 % hm. V této práci byla asfaltová emulze dávkována do všech směsí ve stejném množství (2 % hm.), pro sledování vlastností měnící se vlivem různého množství cementu.

Rejuvenátory tvořily náhradu asfaltové emulze, proto bylo dávkování stanoveno experimentálně a vztaženo k hmotnosti R-materiálu (2 % hm.) Do horkých asfaltových směsí jsou tyto regenerační přísady dávkovány podle množství zbytkového pojiva v R-materiálu. Toto dávkování je řádově nižší (např. 5 % hm. zbytkového pojiva). Přísady jsou míchány do horkého asfaltu, kterým se snadno obalí jednotlivá zrna ve směsi. Při aplikaci rejuvenátorů do studených asfaltových směsí, se stejným dávkováním (vztaženému k množství zbytkového pojiva) jako pro horké asfaltové směsi, by nebylo možné zajistit dostatečné obalení všech zrn R-materiálu rejuvenátorem.

Tab. 4.5 - Receptury navržených směsí

Označení směsi	Kamenivo		Pojivo		Přísady	
AE	R-mat 0/16	100 %	Katebit C 65 B 3	2 % hm.	-	-
AE60	R-mat 0/16	100 %	Katebit C 65 B 3	2 % hm.	-	-
R553	R-mat 0/16	100 %	-	-	Reju 553	2 % hm.
R182	R-mat 0/16	100 %	-	-	Reju 182	2 % hm.
R161	R-mat 0/16	100 %	-	-	Reju 161	2 % hm.
AER	R-mat 0/16	100 %	Katebit C 65 B 3	1 % hm.	Reju 553	1 % hm.
AEC1	R-mat 0/16	100 %	Katebit C 65 B 3	2 % hm.	-	-
			CEM V/A 32,5 R	1 % hm.	-	-
AEC2	R-mat 0/16	100 %	Katebit C 65 B 3	2 % hm.	-	-
			CEM V/A 32,5 R	3 % hm.	-	-



Obr. 4.14 - Přehled navržených směsí

4.2.3 Výroba směsí

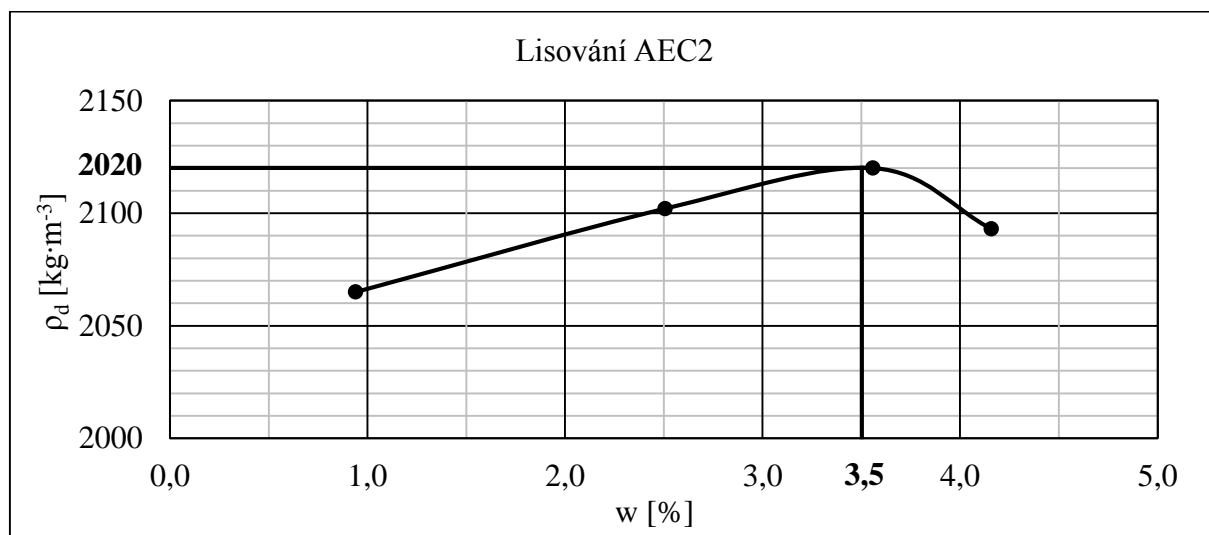
Výroba směsí byla prováděna ručně. Každé výrobě směsi předcházelo vysušení R-materiálu v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Vysušený a následně vychladnutý R-materiál byl dále navlhčen na optimální vlhkost $w_{\text{opt}} = 3 \%$ ($w_{\text{opt}} = 3,5 \%$ pro směsi stmelené kombinací asfaltové emulze a cementu). Následovalo přesné dávkování pojiv nebo přísad. Směs byla ručně řádně promíchána a připravena k dalšímu použití.

Teplota směsí při výrobě byla $20 ^\circ\text{C}$ (laboratorní teplota) a zvýšená teplota $60 ^\circ\text{C}$. Při výrobě směsí s teplotou $60 ^\circ\text{C}$ byl R-materiál nahříván v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a dále míchán s pojivy a přísadami. Takto vyrobené směsi byly ihned zpracovávány, aby při případných prodlevách nedocházelo k jejich ochlazení. Směs AE60 je svým složením totožná se směsí AE. Při výrobě směsi AE60 byla použita asfaltová emulze zahřátá na $60 ^\circ\text{C}$, což simulovalo aplikaci asfaltové emulze distributorem na rozprostřenou vrstvu R-materiálu, pokládanou in-situ.

Pozn.: Pro zjednodušení práce byly navrženy směsi stmelené asfaltovou emulzí, případně s rejuvenátory, vyráběny na základě zhutnitelnosti R-materiálu. Směsi stmelené kombinací asfaltové emulze a cementu, byly vyráběny na základě zhutnitelnosti směsi AEC2 (viz níže). V praxi by bylo nezbytné provést zhutnitelnost pro každou směs zvlášť.

Směs s cementem - zhutnitelnost směsi AEC2

Stanovení zhutnitelnosti bylo provedeno pouze pro směs AEC2. Nepředpokládalo se, že optimální vlhkost směsi AEC1 bude výrazně odlišná od směsi AEC2. Předpoklad byl, že zhutnitelnost obou směsí je stejná. U směsí s cementem, tedy AEC1 a AEC2 byl R-materiál vlhčen na optimální vlhkost $w_{\text{opt}} = 3,5 \%$, viz následující graf. Při výrobě těchto směsí byl cement dávkován do směsi jako poslední.



Graf 4.7 - Zhutnitelnost směsi AEC2

Pozn.: Podrobný protokol viz příloha D. Jeden vzorek byl pro velkou odchylku z měření vyřazen. Z tohoto grafu byly po zaokrouhlení odečteny následující hodnoty:

Maximální suchá objemová hmotnost zhutněného materiálu, $\rho_d = 2\,120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Optimální vlhkost, $w_{\text{opt}} = 3,5 \%$

4.3 PRŮKAZNÍ ZKOUŠKY STUDENÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Průkazní zkoušky studených asfaltových směsí byly provedeny na základě požadavků Technických podmínek TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena - kapitola 7.2: Stmelené směsi. V rámci práce byly navrženy různé teploty hutnění směsí. Teploty hutnění byly 20 °C (laboratorní teplota) a zvýšena teplota 60 °C. Výroba zkušebních těles a průkazní zkoušky jsou popsány v následujících kapitolách. Průkazní zkoušky prováděné na studených asfaltových směsích byly objemová hmotnost, mezerovitost, pevnost v příčném tahu a odolnost proti vodě.

4.3.1 Výroba zkušebních těles

Výroba zkušebních těles byla provedena podle TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena – Příloha B. 2. 5: Výroba zkušebních těles pro stanovení pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě.

Výpočet potřebného množství materiálu pro jednotlivé směsi

Rovnice 9 - Množství R-materiálu

$$m_{R-mat} = \rho_d \cdot V$$

kde m_{R-mat} hmotnost R-materiálu [g]
 ρ_d objemová hmotnost suchého materiálu dle zhutnitelnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 V objem formy [cm^3]

Rovnice 10 - Množství vody

$$m_w = m_{R-mat} \cdot w_{opt}$$

kde m_w hmotnost vody [g]
 m_{R-mat} hmotnost R-materiálu [g]
 w_{opt} optimální množství vody [%]

Rovnice 11 - Množství pojiva a přísad

$$m_p = m_{R-mat} \cdot d$$

kde m_p hmotnost pojiva (přísad) [g]
 m_{R-mat} hmotnost R-materiálu [g]
 d dávkování pojiva (přísad) [%]

Zařízení a pomůcky

Hutnicí forma (výška $h = 100$ mm, průměr $d = 100$ mm); hutnicí lis se schopností vyvolat dostatečnou sílu řízeným způsobem bez vibrace; lis na vytlačení tělesa z formy; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zhutněného vzorku; mísicí nádoba; špachtle; urovnávací pravítko.

Postup

Předem navážená a namíchaná směs byla postupně vsypávána do formy a propichována urovnávacím pravítkem. Poté byla forma s materiálem umístěna do lisu a začalo zatěžování osovou silou ($88,5 \pm 0,5$) kN. Vlivem dohutňování směsi docházelo k poklesům napětí. Proto bylo hutnění prováděno v několika cyklech (obvykle 6 cyklů) až do doby, kdy bylo napětí ustáleno. Po skončení hutnění bylo těleso vytlačeno z formy ručním lisem. Takto vytvořená tělesa byla umístěna na určená místa zrátk.

Pozn.: Jelikož byla vyráběna tělesa s výškou $h = 100$ mm a průměrem $d = 100$ mm bylo hutnění lisováním prováděno pouze jedním pístem. Postup v TP 208 je popsán pro tělesa s výškou 200 mm, u kterých by jeden píst materiál dostatečně nezhutnil.

4.3.2 Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti

Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti bylo provedeno podle TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena – Příloha B. 2. 8: Výpočet mezerovitosti.

Podstata zkoušky

Podstatou těchto zkoušek je z naměřených rozměrů a hmotností zkušebních těles zjistit fyzikálně-mechanické vlastnosti studených asphaltových směsí.

Zařízení a pomůcky

Váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zhutněného vzorku; posuvné měřítko

Postup

Vyrobené těleso bylo po vytlačení změřeno posuvným měřítkem a dále byla zjištěna jeho hmotnost. Výška tělesa byla získána průměrem ze 4 měření.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot byla podle následujících vztahů vypočítána objemová hmotnost (ρ) a mezerovitost (V_m). Výsledky jsou zaznamenány v následujících tabulkách a grafech.

Rovnice 12 - Objemová hmotnost směsi zkušebního tělesa

$$\rho = \frac{m}{V}$$

kde ρ objemová hmotnost směsi zkušebního tělesa [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 m hmotnost zkušebního tělesa [g]
 V objem zkušebního tělesa [cm^3]

Rovnice 13 - Mezerovitost směsi zkušebního tělesa

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho}{\rho_{mv}} \cdot 100 \%$$

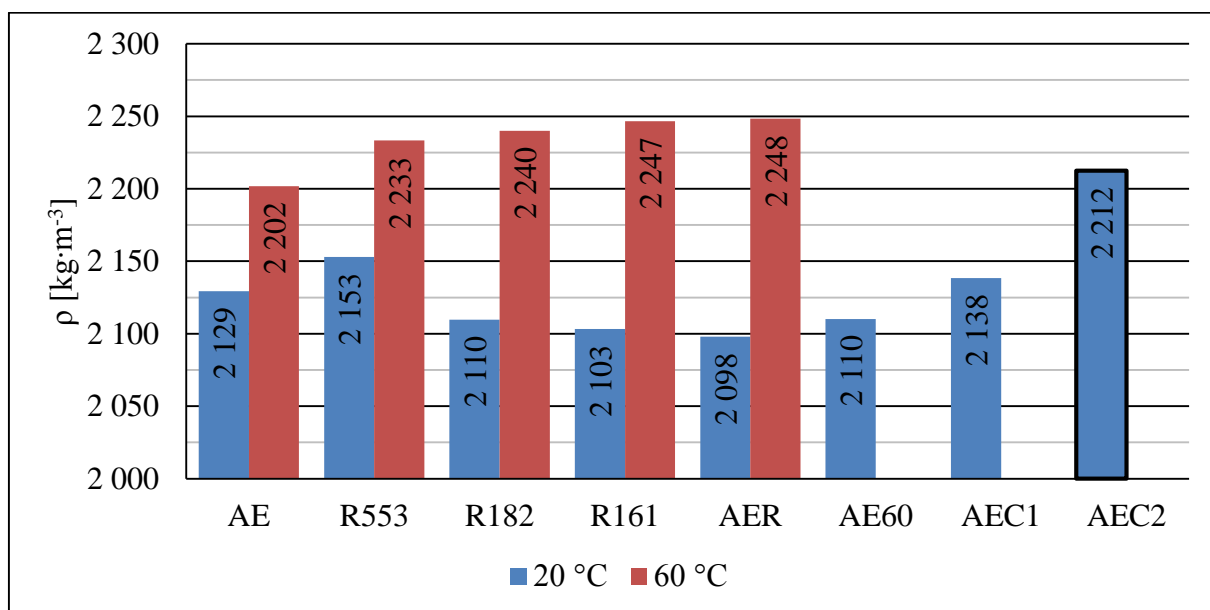
kde V_m mezerovitost směsi zkušebního tělesa [%]
 ρ_{mv} maximální objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 ρ objemová hmotnost zkušebního tělesa [g]

Objemová hmotnost

Výsledky zkoušky uvedené v následující tabulce a grafu byly získány průměrem z 3 zkušebních těles. Podrobný protokol viz příloha E.

Tab. 4.6 - Objemová hmotnost směsí

Teplota hutnění	Objemová hmotnost směsí ρ [kg·m ⁻³]							
	AE	R553	R182	R161	AER	AE60	AEC1	AEC2
20 °C	2 129	2 153	2 110	2 103	2 098	2 110	2 138	2 212
60 °C	2 202	2 233	2 240	2 247	2 248	-	-	-



Graf 4.8 - Srovnání objemových hmotností směsí při různých teplotách hutnění

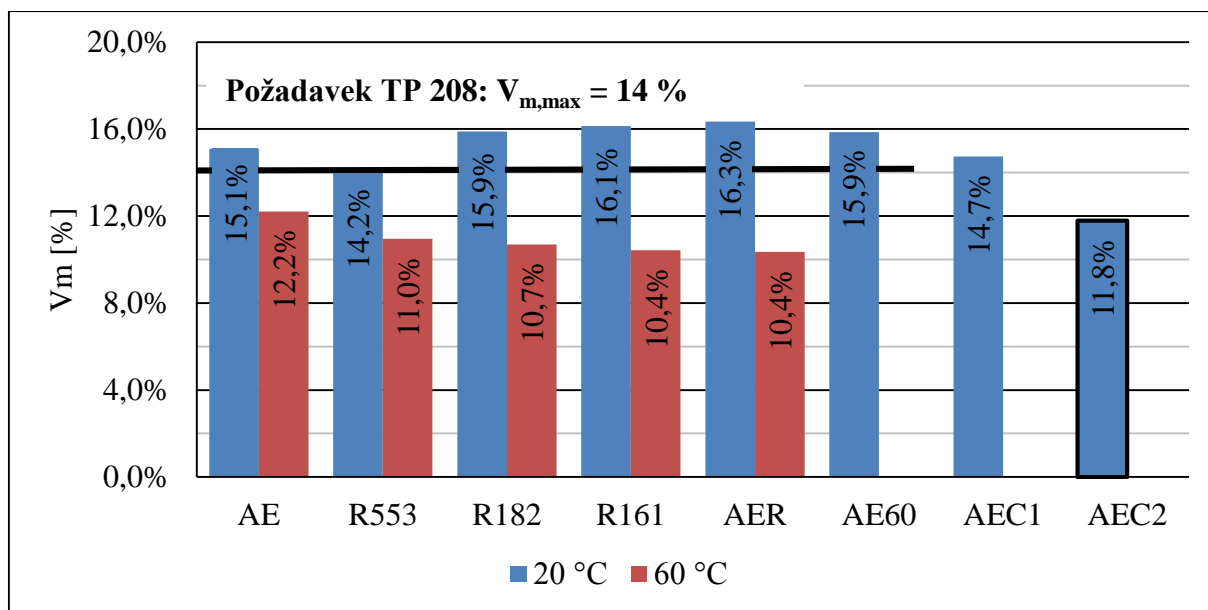
Dle očekávání měla vyšší objemovou hmotnost tělesa vyrobená při teplotě hutnění 60 °C. Zbytkové pojivo v R-materiálu ($s = 5,4 \%$) vlivem vyšší teploty „změklo“ a jednotlivá zrna kameniva v R-materiálu se tak do sebe mohla lépe zaklínit. Tělesa ze směsí stmelené kombinací asfaltové emulze a cementu byla vyráběna na základě zhutnitelnosti směsi AEC2. Suchá objemová hmotnost (ρ_d) směsi AEC2 byla o 20 kg·m^{-3} vyšší než suchá objemová hmotnost (ρ_d) R-materiálu, podle které byly hutněny směsi stmelené asfaltovou emulzí a směsi s rejuvenátory. Proto mají směsi s cementem o něco vyšší objemovou hmotnost než ostatní směsi hutněné při teplotě 20 °C.

Mezerovitost

Výsledky zkoušky uvedené v následující tabulce a grafu byly získány průměrem z 3 zkušebních těles. Podrobný protokol viz příloha E.

Tab. 4.7 - Mezerovitost směsí

Teplota hutnění	Mezerovitost směsí V_m [%]							
	AE	R553	R182	R161	AER	AE60	AEC1	AEC2
20 °C	15,1	14,2	15,9	16,1	16,3	15,9	14,7	11,8
60 °C	12,2	11,0	10,7	10,4	10,4	-	-	-



Graf 4.9 - Srovnání mezerovitosti směsí při různých teplotách hutnění

S objemovou hmotností přímo souvisí mezerovitost, která byla u těles vyrobených při teplotě hutnění 60 °C do 14 %. Právě mezerovitost 14 % je podle TP 208 limitní hodnotou pro směsi stmelené asfaltovou emulzí. Tomuto požadavku vyhověla pouze tělesa vyrobená při teplotě hutnění 60 °C. U směsí stmelených kombinací asfaltové emulze a cementu se mezerovitost nesleduje. Uvedené hodnoty jsou pouze pro porovnání rozdílu mezi navrženými směsmi.



Obr. 4.15 - Přehled zkušebních těles hutněných při teplotě 20 °C

4.3.3 Stanovení pevnosti v příčném tahu

Stanovení pevnosti v příčném tahu bylo provedeno podle ČSN EN 13286 – 42 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 42: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsí stmelených hydraulickými pojivy.

Jelikož jde o směsi z R-materiálu, postup zkoušky byl upraven podle TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena – Příloha B. 2. 9: Stanovení pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě.

Podstata zkoušky

Podstatou této zkoušky je vystavit válcové zkušební těleso tlaku, který působí na dvou protilehlých tlačných páscích na obvodu tělesa, až do jeho porušení. Ze síly odečtené při porušení tělesa je vypočítána pevnost v příčném tahu.

Zařízení a pomůcky

Zkušební lis a indikace zatížení s přesností měření zatěžovací síly $\pm 1\%$; ocelové tlačné kleště; tlačné pásky z překližky; komora s konstantní vlhkostí a teplotou vzduchu; komora pro temperaci zkušebních těles; váhy s přesností $\pm 0,1\%$ hmotnosti zhutněného vzorku.



Obr. 4.16 - Pevnost v příčném tahu R_{it}

Postup

Vyrobená tělesa (výška $H = 100\text{ mm}$, průměr $D = 100\text{ mm}$) podle postupu z kapitoly 4.3.1 byla umístěna na určené místo zráti. Tělesa ze směsi stmelené asfaltovou emulzí a tělesa ze směsi s rejuvenátory byla umístěna v laboratoři, kde zrála při laboratorní teplotě $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ a laboratorní přirozené vlhkosti po dobu 7 dní. Tělesa ze směsi stmelené asfaltovou emulzí a cementem byla umístěna v komoře s konstantní vlhkostí $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$ a konstantní teplotou $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ po dobu 7 dní. Po předepsané době zrání byla tělesa umístěna na 4 hodiny do komory s konstantní teplotou $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$. Po temperaci byla zjištěna hmotnost zkušebních těles. Dále byla umístěna na tlačné pásky do ocelových kleští. Ocelové kleště se zkušebním tělesem byly vloženy do zkušebního lisu. Zatěžování probíhalo při konstantním posunu čelisti lisu $(50 \pm 1)\text{ mm/min}$ až do porušení zkušebního tělesa. Měřicí zařízení odečítalo hodnoty zatěžovacích sil a přetvoření v průběhu zatěžování.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot (maximální síla při porušení tělesa a tomu odpovídající přetvoření) byla podle následujícího vztahu vypočítána pevnost v příčném tahu (R_{it}). Výsledky jsou zaznamenány v následující tabulce a grafu a byly získány průměrem z 3 hodnot. Podrobný protokol viz příloha F.

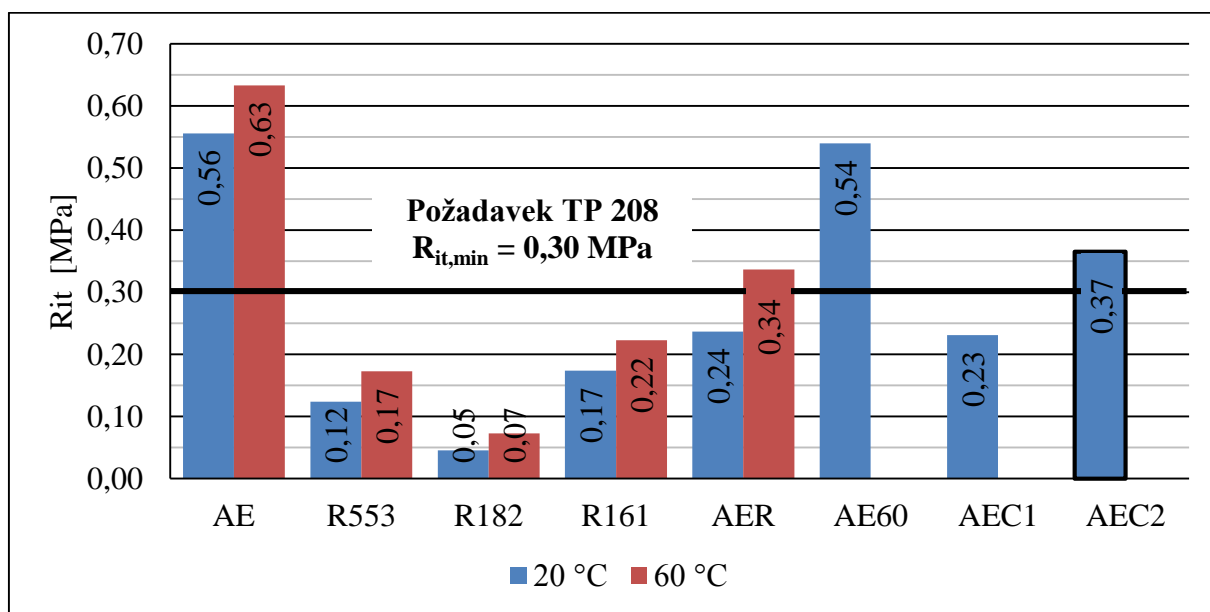
Rovnice 14 - Pevnost v příčném tahu R_{it}

$$R_{it} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot H \cdot D}$$

kde R_{it} pevnost zkušebního tělesa v příčném tahu [MPa]
 F maximální zatěžovací síla při porušení zkušebního tělesa [N]
 H výška zkušebního tělesa [mm]
 D průměr zkušebního tělesa [mm]

Tab. 4.8 - Pevnost v příčném tahu

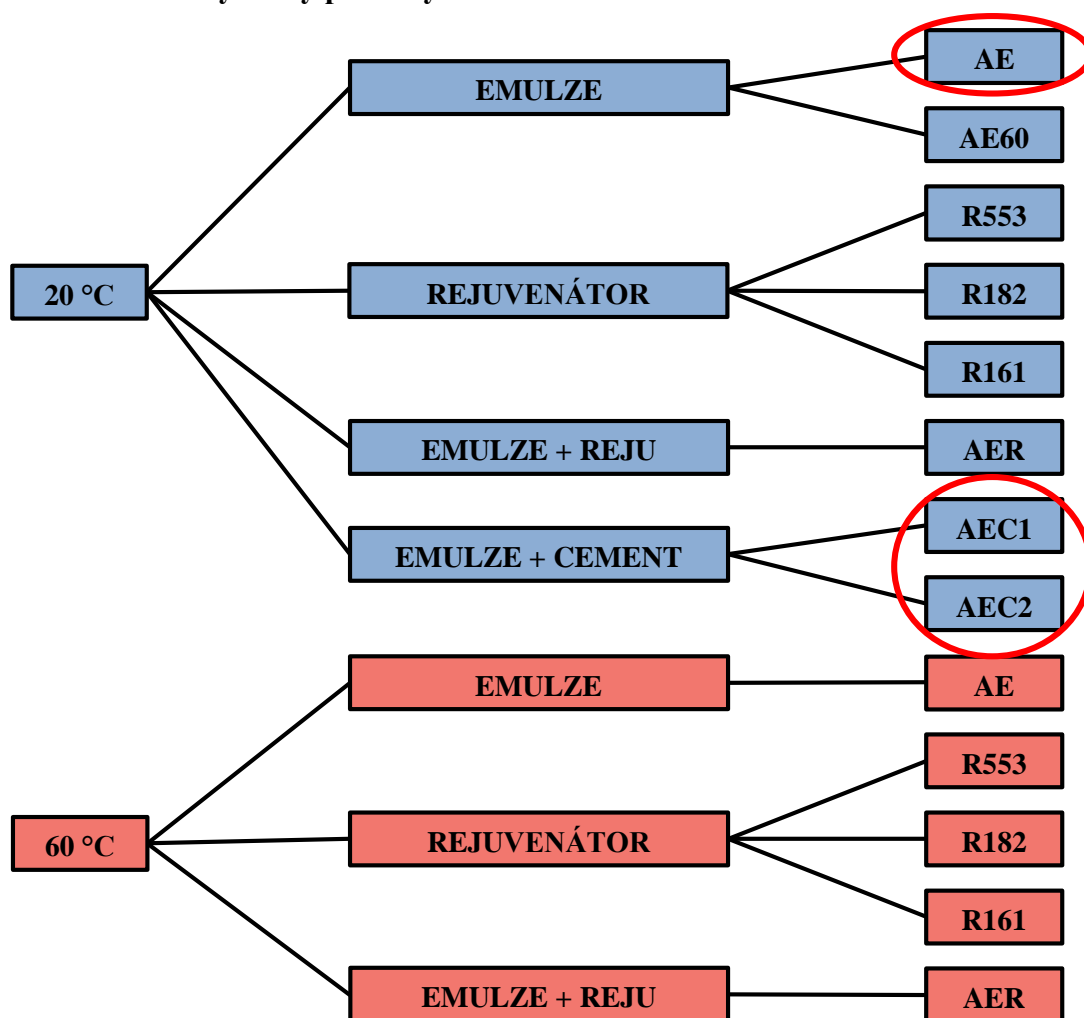
Teplota hutnění	Pevnost v příčném tahu R_{it} [MPa]							
	AE	R553	R182	R161	AER	AE60	AEC1	AEC2
20 °C	0,56	0,12	0,05	0,17	0,24	0,54	0,23	0,37
60 °C	0,63	0,17	0,07	0,22	0,34	-	-	-
Přetvoření [mm]								
	AE	R553	R182	R161	AER	AE60	AEC1	AEC2
20 °C	2,83	1,99	1,68	1,78	2,19	2,67	1,96	2,00
60 °C	2,28	1,88	1,45	1,69	1,81	-	-	-



Graf 4.10 - Srovnání pevností v příčném tahu při různých teplotách hutnění

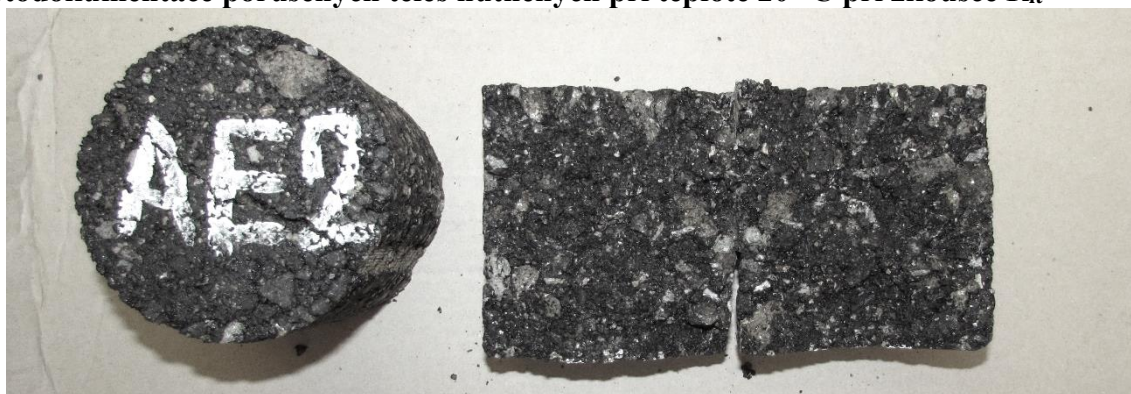
Ze získaných výsledků je patrné, že požadavkům na pevnost v příčném tahu podle TP 208 ($R_{it} \geq 0,30$ MPa) vyhověly pouze 4 navržené směsi. Tělesa vyrobená při teplota hutnění 60 °C nevykazují výrazně vyšší pevnosti oproti teplotě 20 °C. Ohřívání R-materiálu na teplotu 60 °C je tedy neefektivní, další zkoušky budou provedeny na tělesech hutněných při 20 °C. Dále lze z grafu usoudit, že směsi R-materiálu a rejuvenátory zdaleka nesplňují požadavek na minimální pevnost v příčném tahu. Zajímavý je rozdíl pevností mezi směsí AE a AEC1. Obě směsi obsahují stejné množství asfaltové emulze, ve směsi AEC1 je navíc 1 % hm. Dalo by se tedy předpokládat, že tělesa z této směsi budou vykazovat vyšší odolnost proti tahovému napětí. Z těchto důvodů byly pro další zkoušení vybrány tyto směsi AE, AEC1 a AEC2, které byly vyráběny při laboratorní teplotě 20 °C. Tyto směsi jsou stmelené stejným množstvím asfaltové emulze (2 % hm.), ale v každé směsi je pak jiné množství cementu (AE = 0 % hm.; AEC1 = 1 % hm.; AEC2 = 3 % hm.). Při dalším zkoušení budou sledovány změny vlastností s rostoucím dávkováním cementu do studených asfaltových směsí.

Pro další zkoušení vybrány pouze tyto směsi.



Obr. 4.17 - Přehled vybraných směsí pro další zkoušení

Fotodokumentace porušených těles hutněných při teplotě 20 °C při zkoušce R_{it}



Obr. 4.18 - Směs AE - porušené těleso při zkoušce R_{it}



Obr. 4.19 - Směs R553 - porušené těleso při zkoušce R_{it}



Obr. 4.20 - Směs R182 - porušené těleso při zkoušce R_{it}

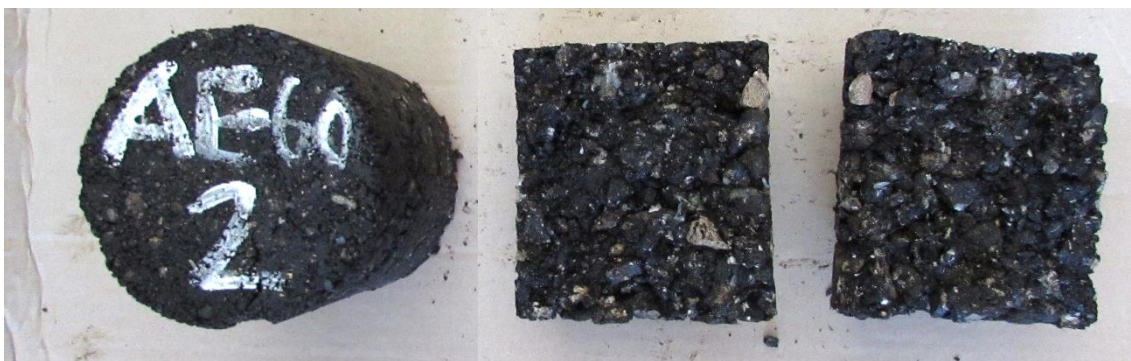


Obr. 4.21 - Směs R161 - porušené těleso při zkoušce R_{it}

Fotodokumentace porušených těles hutněných při teplotě 20 °C při zkoušce R_{it}



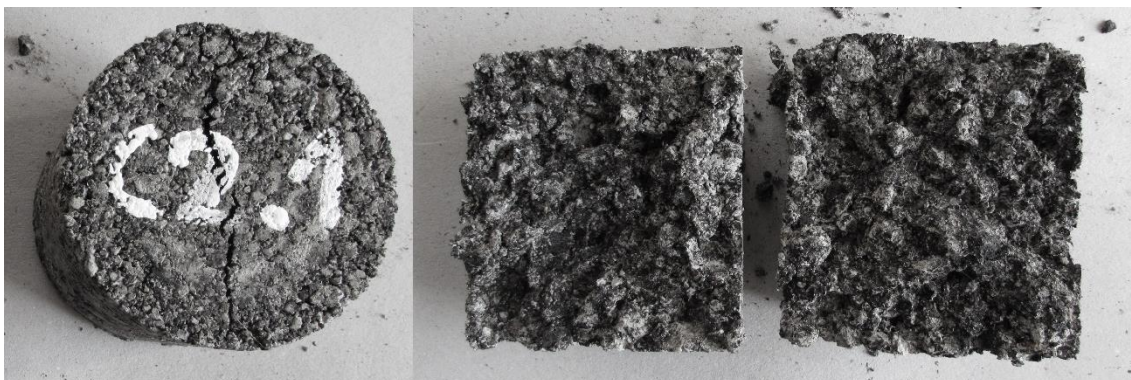
Obr. 4.22 - Směs AER - porušené těleso při zkoušce R_{it}



Obr. 4.23 - Směs AE60 - porušené těleso při zkoušce R_{it}



Obr. 4.24 - Směs AEC1 - porušené těleso při zkoušce R_{it}



Obr. 4.25 - Směs AEC2 - porušené těleso při zkoušce R_{it}

4.3.4 Stanovení odolnosti proti vodě

Stanovení odolnosti proti vodě bylo provedeno podle TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena – Příloha B. 2. 9: Stanovení pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě.

Podstata zkoušky

U této zkoušky se zjišťuje vliv vody na vlastnosti studené asfaltové směsi. Princip zatěžování zkušebních těles je stejný jako u zkoušky pevnosti v příčném tahu, pouze jsou před zkouškou tělesa saturována vodou. Výsledkem zkoušky je poměr mezi pevností v příčném tahu po saturaci k pevnosti v příčném tahu bez saturace.

Zařízení a pomůcky

Stejně jako v kapitole 4.3.3.

Postup

Výroba zkušebních těles, rozměry těles a postup zkoušky byl stejný jako při zkoušce v příčném tahu R_{it} . Rozdíl byl pouze ve zrání zkušebních těles. Tělesa vyrobená při této zkoušce byla umístěna na 7 dní v laboratoři při laboratorní teplotě $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a přirozené vlhkosti. Tělesa ze směsí stmelených kombinací asfaltové emulze a cementu (AEC1 a AEC2) byla umístěna po dobu 7 dní v komoře s konstantní vlhkostí $(90 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a konstantní teplotou $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Po 7 dnech zrání na vzduchu, byla tělesa umístěna do nádoby s vodou, kde se tělesa nechala saturovat po dobu 7 dní. Po této saturaci byla tělesa osušena a umístěna na 4 hodiny do komory s konstantní teplotou $(15 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Dále byl postup zkoušky stejný jako v předchozí kapitole.

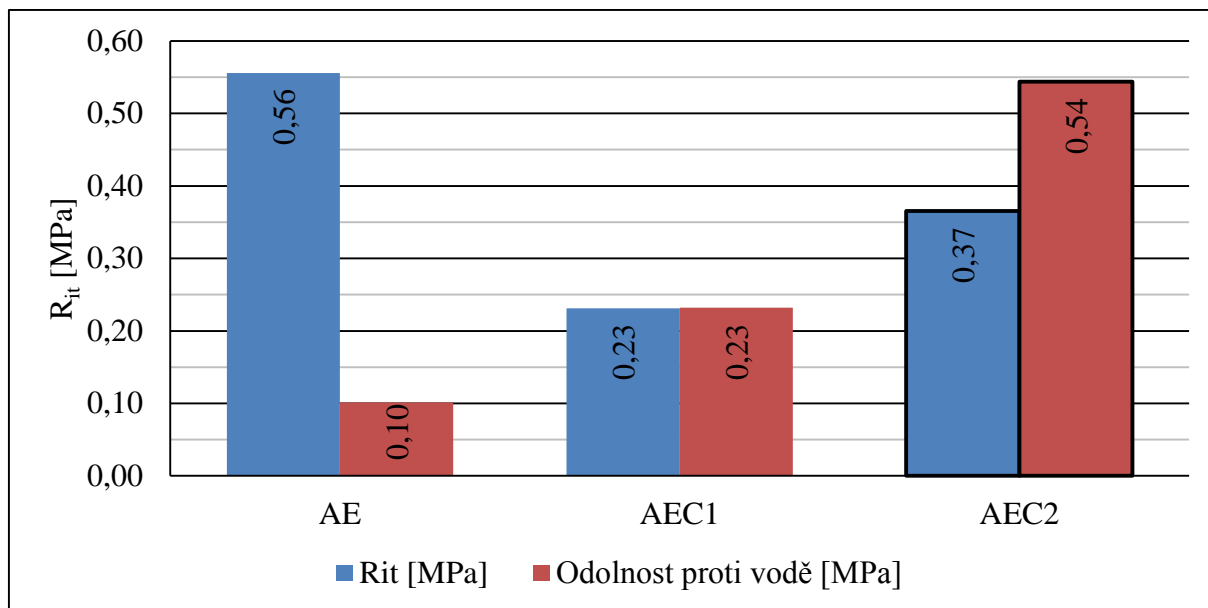
Vyhodnocení

Postup vyhodnocení zkoušky odolnosti proti vodě byl stejný jako u pevnosti v příčném tahu (R_{it}). Sleduje se rozdíl pevností zkušebních těles, která zrála na vzduchu s pevností zkušebních těles zrajících na vzduchu a ve vodě. Podrobný protokol viz příloha G.

Tab. 4.9 - Odolnost proti vodě

Teplota hutnění $20 ^\circ\text{C}$	AE	AEC1	AEC2
Pevnost v příčném tahu R_{it} [MPa]	0,56	0,23	0,37
Odolnost proti vodě [MPa]	0,10	0,23	0,54
Přetvoření [mm]	1,49	1,50	1,36
Pevnost vztažená k R_{it} [%]	17,8 %	100 %	145,9 %
Požadavek 60 % z R_{it}	NESPLNĚNO	-	-
Požadavek 75 % z R_{it}	-	SPLNĚNO	SPLNĚNO

Pozn.: Směs AEC1 nevyhověla požadavku na minimální pevnost v příčném tahu $R_{it,min} = (0,30 - 0,70)$ MPa a ani nesplnila požadavek na odolnost proti vodě. Navržená směs je tedy nevhodná pro použití do vozovky.



Graf 4.11 - Srovnání pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě

Ze získaných hodnot je patrné že vyhověla požadavkům TP 208 na odolnost proti vodě vyhověli pouze směsi stmelené kombinací asfaltové emulze a cementu. Požadavky TP 208 na pevnost v příčném tahu (R_{it}) a zároveň na odolnost proti vodě splnila pouze směs AEC2. Asfaltová emulze s dostatečným množstvím cementu (u směsi AEC2 3 % hm.) stmelí směs natolik, že odolává tahovým napětím a zároveň účinku vody. Je též patrné, že se pevnost těles ze směsi AEC2 po dobu zrání ve vodě ještě zvýšila. To je zapříčiněné probíhající hydratací cementu ve směsi.

Z navržených studených asfaltových směsí vyhověla průkazným zkouškám, uvedených v TP 208, pouze směs s označením AEC2. Z navržených směsí je tedy jediná vhodná pro podkladní vrstvy málo zatížených vozovek, např. komunikací III. tříd a místních komunikací.

4.4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ STUDENÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Experimentálním měřením jsou myšleny zkoušky, které nejsou pro vybrané směsi předepsané v technických podmínkách TP 208. Jedná se zejména o pevnost v tlaku (R_c) a dále funkční zkoušku pro zjištění dalších charakteristik studených asfaltových směsí jako je modul pružnosti (E_r). Pevnost v tlaku byla provedena z důvodu hledání příčiny významného rozdílu pevností v příčném tahu u směsí AE a AEC, ale také z důvodu doplnění modulu pružnosti (E_r). Pomocí funkčních zkoušek získáváme informace o možném chování vybraných směsí po případném zabudování do konstrukce vozovky. Funkční zkoušky se snaží simulovat skutečné prostředí vozovky a také skutečné (dynamické) namáhání konstrukčních vrstev vlivem dopravního zatížení.

4.4.1 Výroba zkušebních těles

Stanovení pevnosti v tlaku

Výška zkušebního tělesa ($H = 100 \text{ mm}$), průměr zkušebního tělesa ($D = 100 \text{ mm}$).

Postup výroby zkušebních těles byl stejný jako u výroby těles pro průkazní zkoušky. Tento postup je popsán v kapitole 4.3.1.

Stanovení modulu pružnosti

Výška zkušebního tělesa ($H = 200 \text{ mm}$), průměr zkušebního tělesa ($D = 100 \text{ mm}$).

Předem navážená a namíchaná směs byla postupně vsypávána do formy a propichována urovnávacím pravítkem. Poté byla forma s materiálem umístěna do lisu a začalo zatěžování dvěma písty (jeden shora, druhý zdola) osovou silou ($88,5 \pm 0,5 \text{ kN}$). Vlivem dohutňování směsi docházelo k poklesům napětí. Proto bylo hutnění prováděno v několika cyklech (obvykle 6 cyklů) až do doby, kdy bylo napětí ustáleno. Po skončení hutnění bylo těleso vytlačeno z formy ručním lisem. Takto vytvořená tělesa byla umístěna na určená místa zrátk.

4.4.2 Stanovení pevnosti v tlaku (28 denní)

Stanovení pevnosti v prostém tlaku bylo provedeno podle ČSN EN 13286 – 41 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy.

Podstata zkoušky

Zkušební těleso je vystaveno svislému zatížení, které konstantní rychlostí roste, až do jeho porušení. Ze zaznamenané maximální svislé síly při porušení tělesa je vypočítána pevnost v tlaku.

Zařízení a pomůcky

Zkušební lis a indikace zatížení s přesností měření zatěžovací síly $\pm 1 \%$; ocelová tlačná deska; komora s konstantní vlhkostí a teplotou vzduchu; váhy s přesností $\pm 0,1 \%$ hmotnosti zhutněného vzorku.



Obr. 4.26 - Pevnost v tlaku R_c

Postup

Vyrobená tělesa (výška $H = 100 \text{ mm}$, průměr $D = 100 \text{ mm}$) podle postupu z kapitoly 4.3.1 byla umístěna na určené místo zráti. Tělesa ze směsi stmelené asfaltovou emulzí byla umístěna v laboratoři, kde zrála při laboratorní teplotě $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a laboratorní přirozené vlhkosti po dobu 28 dní. Tělesa ze směsi stmelené asfaltovou emulzí a cementem byla umístěna v komoře s konstantní vlhkostí $(90 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a konstantní teplotou $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ po dobu 28 dní. Po předepsané době zrání se tělesa umístila do lisu. Na tělesa se umístila tlačná deska a začalo zatěžování. Zatěžování probíhalo při konstantním posunu čelisti lisu až do porušení zkušebního tělesa, které mělo nastat do 60 sekund po zahájení zatěžování. Měřicí zařízení odečítalo hodnoty zatěžovacích sil a přetvoření v průběhu zatěžování.

Vyhodnocení

Z naměřených hodnot (maximální síla při porušení tělesa a tomu odpovídající přetvoření) byla podle následujícího vztahu vypočítána pevnost v prostém tlaku (R_c). Výsledky jsou zaznamenány v následující tabulce a grafu a byly získány průměrem z 2 hodnot. Podrobný protokol viz příloha H.

Pozn.: Standardně bývá výsledná pevnost získávána průměrem z 3 naměřených hodnot. V této práci jde o experimentální měření, kde postačí výsledek získaný průměrem z 2 hodnot.

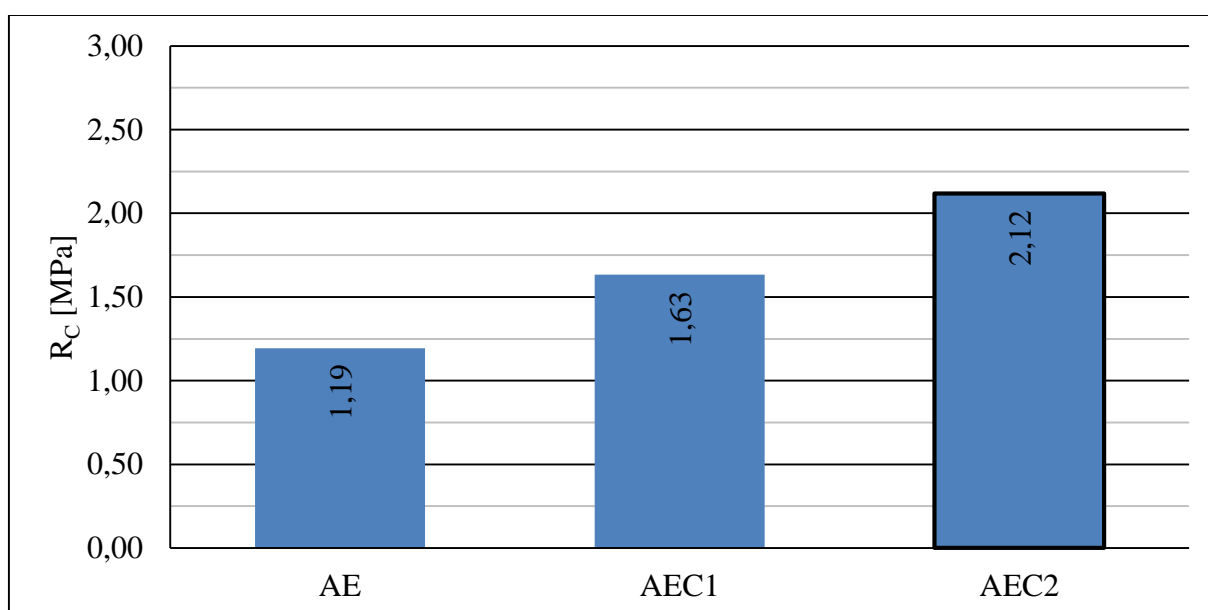
Rovnice 15 - Pevnost v tlaku R_c

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

kde R_c pevnost zkušební tělesa v tlaku [MPa]
 F maximální zatěžovací síla při porušení zkušební tělesa [N]
 A_c zatěžovací plocha zkušební tělesa [mm²]

Tab. 4.10 - Pevnost v tlaku (28 denní)

Teplota hutnění 20 °C	AE	AEC1	AEC2
Pevnost v tlaku R_c [MPa] (28 denní)	1,19	1,63	2,12
Přetvoření při porušení tělesa [mm]	2,58	2,44	2,19



Graf 4.12 - Porovnání pevnosti v tlaku (28 denní)

Pevnost v tlaku roste takřka lineárně s rostoucím dávkováním cementu. Zároveň zkušební tělesa z vybraných směsí ztrácejí pružnost, ne ale natolik, aby byla tělesa porušena dle ČSN EN 13286 - 41 a to ve tvaru „přesýpacích hodin“. Tělesa byla pouze stlačena, přičemž došlo k vyboulení těles do stran. U směsi AE došlo pouze ke stlačení těles bez výrazných trhlin. U směsí stmelených kombinací asfaltové emulze a cementu docházelo ke tvorbě trhlin. Právě trhliny na tělesech ze směsi AEC1 jsou důsledkem ztráty pružnosti a zvýšení křehkosti. Proto tělesa z této směsi nebyla schopna odolat tahovým napětím při zkoušce pevnosti v příčném tahu (R_{it}).

Fotodokumentace porušených těles hutněných při teplotě 20 °C při zkoušce R_c



Obr. 4.27 - Směs AE - porušené těleso při zkoušce R_c



Obr. 4.28 - Směs AEC1 - porušené těleso při zkoušce R_c



Obr. 4.29 - Směs AEC2 - porušené těleso při zkoušce R_c

4.4.3 Stanovení modulu pružnosti (28 denní)

Stanovení modulu pružnosti bylo provedeno podle ČSN EN 13286 – 7 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji.

Zkušební metoda B – zjednodušený režim napětí s cyklickým osovým deviátorem napětí a konstantním komorovým tlakem.

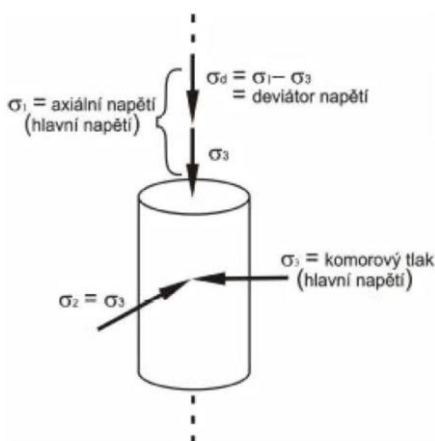
Podstata zkoušky

Jedná se o tzv. funkční zkoušku, při které je chování konstrukční vrstvy ve vozovce simulováno v laboratoři. Cyklická triaxiální zkouška spočívá v zatěžování válcových těles cyklickým napětím, které kopíruje různý rozsah napětí působící na konstrukční vrstvu vozovky. Podstatou zkoušky je měření pružného chování válcových těles, které je dosaženo v důsledku působení předběžného cyklického zatěžování tělesa (kondicionování). Kondicionování simuluje dodatečné zhutnění vrstvy pojezdem těžkých nákladních vozidel. Při tomto procesu dojde vlivem velkého počtu zatěžovacích cyklů k ustálení stálého přetvoření materiálu (dojde k odstranění trvalých deformací, které vznikají při prvních zatěžovacích cyklech). Po kondicionování následuje zatěžování řadou cyklů o různém napětí, kdy je měřena hodnota pružného přetvoření a tomu odpovídající napětí. Výsledkem zkoušky jsou moduly pružnosti (E_r), které odpovídají danému svislému zatížení.

Modul pružnosti (E_r) roste se zvyšujícím se svislým napětím (σ_1). Svislé napětí se zvětšuje s rostoucím komorovým tlakem (σ_3). Komorový tlak simuluje tlak prostředí ve vozovce vyvozený ve vodorovném směru vlivem zatížení dopravou. Tlak kol od vozidel je roznášen ve vozovce přibližně pod úhlem 45 °. Z rostoucí hloubkou vodorovné síly v jednotlivých vrstvách klesají a tím klesá i napětí.

Zařízení a pomůcky

Triaxiální tlaková komora; pracovní médium – vzduch; snímače tlaku o osově síly; snímače deformace; membrána; komora s konstantní vlhkostí a teplotou vzduchu; váhy s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zhutněného vzorku.



Obr. 4.30 - Zatěžovací schéma



Obr. 4.31 - Triaxiální přístroj

Postup

Vyrobená tělesa (výška $H = 200$ mm, průměr $D = 100$ mm) podle postupu 4.4.1 byla umístěna na předem stanovené místo zráat. Tělesa ze směsi stmelené asfaltovou emulzí byla umístěna v laboratoři, kde zrála při laboratorní teplotě (20 ± 2) °C a laboratorní přirozené vlhkosti po

dobu více jak 28 dní. Tělesa ze směsi stmelené asfaltovou emulzí a cementem byla umístěna v komoře s konstantní vlhkostí (90 ± 5) °C a konstantní teplotou (20 ± 2) °C po dobu více jak 28 dní. Po uvedené době zrání byla zjištěna hmotnost zkušebního tělesa. Následně byla na těleso navléknuta membrána, která zabráňovala odpadávání drobných úlomků materiálu během zkoušky. Zkušební těleso s navléknutou membránou bylo umístěno do triaxiálního přístroje, který byl poté uzavřen. Po kontrole vstupních údajů v softwaru byla zahájena zkouška. Nejprve probíhalo kondicionování (10 000 cyklů) při konstantním komorovém tlaku (σ_3). Po kondicionování bylo těleso zatěžováno svislým napětím při proměnlivém komorovém tlaku. Deviator napětí (σ_d) a komorový tlak (σ_3) je měněn ve 30 krocích, kdy v každém kroku je těleso vystaveno 100 zatěžovacích cyklů. Při zatěžování je měřena svislá deformace tělesa při různém svislém napětí (σ_1), tyto hodnoty jsou vyneseny do grafu (pracovní diagram). Z naměřených hodnot jsou následně vypočítány hodnoty modulu pružnosti (E_r) pro jednotlivé svislé napětí (σ_1).

Pozn.: Místo obvyklého počtu cyklů při kondicionování (20 000 cyklů) bylo použito 10 000 cyklů. Obvyklý počet cyklů je určen pro nestmelené materiály a především pro zeminy. Studené asfaltové směsi jsou tvořeny hrubozrnnou kostrou kameniva (R-materiálu), pružné deformace těchto směsí ustáleny dříve než např. u plastických zemín. Proto byl počet cyklů při kondicionování snížen na polovinu.

Pozn.: Doba zrání těles byla ovlivněna poruchou triaxiálního přístroje, proto přesahuje časový horizont 28 dní. Právě do této doby se předpokládá nárůst pevnosti směsí stmelených kombinací asfaltové emulze a cementu, vlivem hydratace cementu. Rozdíly mezi hodnotami naměřenými právě při 28 dnech a hodnotami naměřenými po této době by se neměli příliš lišit. Naměřené hodnoty modulů pružnosti jsou proto vztažené k hodnotám pevnosti v tlaku po 28 dnech.

Vyhodnocení

Rovnice 16 - Deviator napětí

$$\sigma_{d,i} = \sigma_{1,i} - \sigma_{3,i}$$

kde $\sigma_{d,i}$ deviator napětí [kPa]
 $\sigma_{1,i}$ svislé napětí [kPa]
 $\sigma_{3,i}$ komorový tlak (hlavní napětí) [kPa]

Rovnice 17 - Poměrné přetvoření při zatížení

$$\varepsilon_{1,i} = \frac{\Delta h_{1,i}}{H}$$

kde $\varepsilon_{1,i}$ poměrné přetvoření zkušebního tělesa při zatížení [-]
 $\Delta h_{1,i}$ změna výšky zkušebního tělesa při zatížení [mm]
 H výška zkušebního tělesa [mm]

Rovnice 18 - Poměrné přetvoření při odtížení

$$\varepsilon_{2,i} = \frac{\Delta h_{2,i}}{H}$$

kde $\varepsilon_{2,i}$ poměrné přetvoření zkušebního tělesa při odtížení [-]
 $\Delta h_{2,i}$ změna výšky zkušebního tělesa při odtížení [mm]
 H výška zkušebního tělesa [mm]

Rovnice 19 - Pružné poměrné přetvoření

$$\varepsilon_{1,i}^r = \varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{2,i}$$

kde $\varepsilon_{1,i}^r$ pružné poměrné přetvoření [-]
 $\varepsilon_{1,i}$ poměrné přetvoření zkušebního tělesa při zatížení [-]
 $\varepsilon_{2,i}$ poměrné přetvoření zkušebního tělesa při odtížení [-]

Rovnice 20 - Svislé napětí při zatížení

$$\sigma_{1,max,i} = \sigma_{3,i} - \sigma_{d,i}$$

kde $\sigma_{1,max,i}$ svislé napětí při zatížení [kPa]
 $\sigma_{3,i}$ komorový tlak (hlavní napětí) [kPa]
 $\sigma_{d,i}$ deviátor napětí [kPa]

Rovnice 21 - Svislé napětí při odtížení

$$\sigma_{1,min,i} = \sigma_{3,i} - \sigma_{d,i}$$

kde $\sigma_{1,min,i}$ svislé napětí při odtížení [kPa]
 $\sigma_{3,i}$ komorový tlak (hlavní napětí) [kPa]
 $\sigma_{d,i}$ deviátor napětí [kPa]

Rovnice 22 - Svislé napětí

$$\sigma_{1,i}^r = \sigma_{1,max,i} - \sigma_{1,min,i}$$

kde $\sigma_{1,i}^r$ svislé napětí [kPa]
 $\sigma_{1,max}$ svislé napětí při zatížení [kPa]
 $\sigma_{1,min}$ svislé napětí při odtížení [kPa]

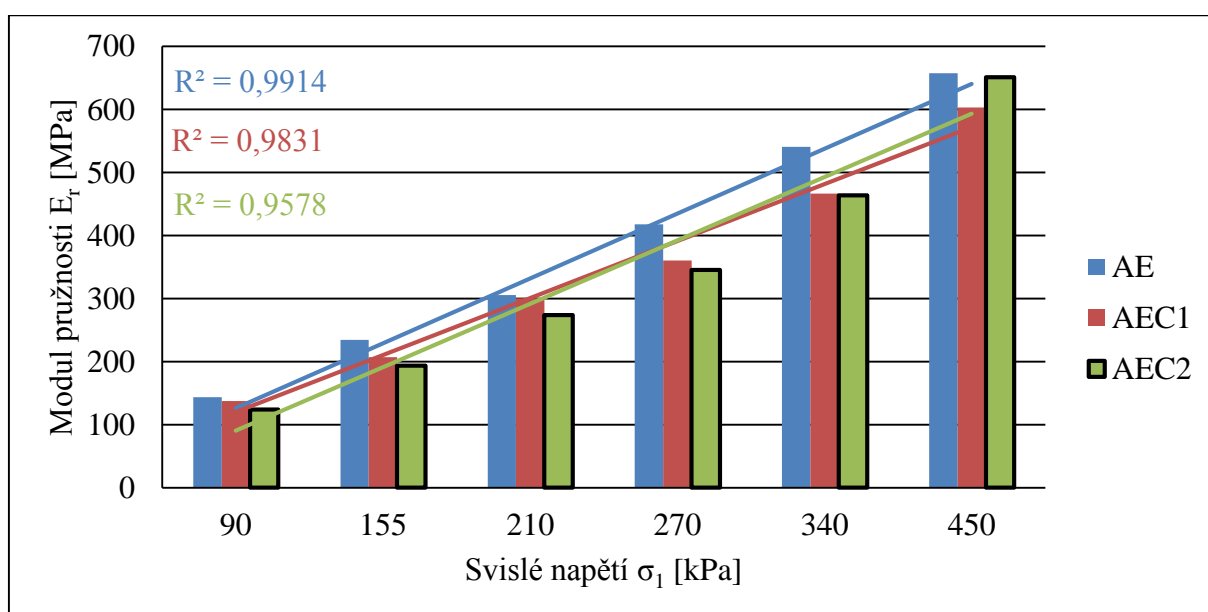
Rovnice 23 - Modul pružnosti

$$E_{r,i} = \frac{\sigma_{1,i}^r}{\varepsilon_{1,i}^r}$$

kde $E_{r,i}$ modul pružnosti [kPa]
 $\sigma_{1,i}^r$ svislé napětí [kPa]
 $\varepsilon_{1,i}^r$ pružné poměrné přetvoření [-]

Tab. 4.11 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B – úroveň nízké napětí)

Komorový tlak σ_3	Deviátor napětí σ_d	Svislé napětí σ_1	Modul pružnosti E_r [MPa]		
[kPa]	[kPa]	[kPa]	AE	AEC1	AEC2
20	70	90	143,3	137,6	123,8
35	120	155	234,5	206,9	193,5
50	160	210	305,6	300,5	273,7
70	200	270	417,8	360,4	345,5
100	240	340	540,5	466,4	463,6
150	300	450	657,6	603,0	651,0



Graf 4.13 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B - úroveň nízkého napětí)

Pozn.: Hodnoty v grafu byly proloženy regresními přímkami pro jednotlivé směsi. Hodnoty spolehlivosti regrese (R^2) jsou uvedeny v grafu v levém horním rohu.

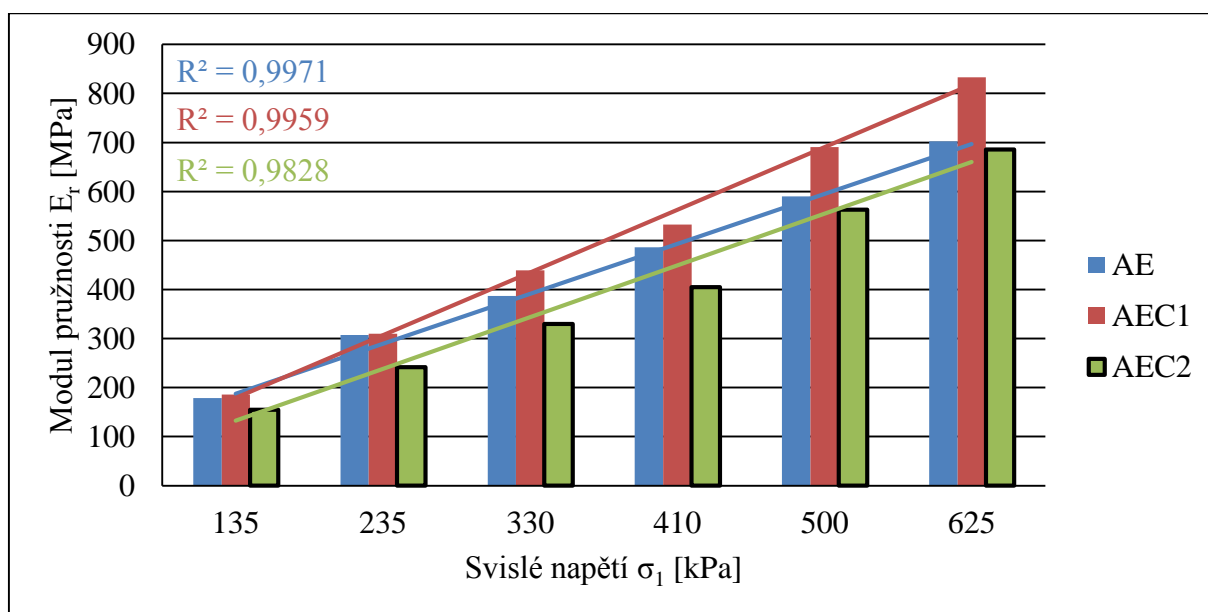
Úroveň nízkého napětí simuluje pomalou těžkou nákladní dopravu o nízké intenzitě (rychlost vozidel do cca 40 km/h jedoucí např. na místních komunikacích). Při předpokládaném položení těchto směsí do vozovky jako horní podkladní vrstvy (pod dvě asfaltové vrstvy), můžeme hodnoty z modulů pružnosti odečítat při svislém zatížení $\sigma_1 = 450$ kPa.

Pozn.: V České republice recyklovaná vrstva, vytvořená při recyklacích vozovek za studena na místě, obvykle tvoří právě horní podkladní vrstvu vozovky, na kterou jsou kladeny dvě asfaltové vrstvy.

Z naměřených výsledků je patrné, že moduly pružnosti jednotlivých směsí nejsou výrazně odlišné. Při svislém napětí $\sigma_1 = 450$ kPa hodnoty modulů pružnosti odpovídají nejkvalitnější nestmelené podkladní vrstvě, mechanicky zpevněnému kamenivu (MZK). Návrhová hodnota modulu pružnosti MZK je $E_r = 600$ MPa.

Tab. 4.12 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B – úroveň vysokého napětí)

Komorový tlak σ_3	Deviátor napětí σ_d	Svislé napětí σ_1	Modul pružnosti E_r [MPa]		
[kPa]	[kPa]	[kPa]	AE	AEC1	AEC2
20	115	135	178,9	185,6	154,7
35	200	235	307,6	309,6	241,8
50	280	330	386,8	439,3	329,5
70	340	410	485,9	532,8	404,6
100	400	500	590,3	690,4	563,1
150	475	625	702,4	833,1	685,8



Graf 4.14 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B - úroveň vysokého napětí)

Pozn.: Hodnoty v grafu byly proloženy regresními přímkami pro jednotlivé směsi. Hodnoty spolehlivosti regrese (R^2) jsou uvedeny v grafu v levém horním rohu.

Úroveň vysokého napětí simuluje rychlejší těžkou nákladní dopravu o vyšší intenzitě (rychlost vozidel nad cca 40 km/h jedoucí např. na komunikacích III. třídy). Při předpokládaném položení těchto směsí do vozovky jako horní podkladní vrstvy, převážně na komunikacích III. třídy, můžeme hodnoty z modulů pružnosti odečítat při svislém zatížení $\sigma_1 = 625$ kPa.

Z naměřených hodnot při cyklické zatěžovací zkoušce v triaxiálním přístroji, metoda B – úroveň vysokého napětí je zřejmé, že při nejvyšším svislém napětí $\sigma_1 = 625$ kPa má nejvyšší hodnotu modulu pružnosti směs AEC1. Je překvapivé, že výsledky cyklické zatěžovací zkoušky v triaxiálním přístroji, metoda B – úroveň nízkého napětí, jsou opačné. Směs AEC1 má nejnižší modul pružnosti. Shodně všechny směsi mají, při nejvyšším svislém napětí, modul pružnosti o něco vyšší než je návrhový modul pružnosti MZK ($E_r = 600$ MPa).

5 ZÁVĚR

Teoretická část

Cílem teoretické části práce bylo provést rešerši literatury o provádění studených recyklací netuhých vozovek za studena. Popsat možnosti použití této technologie a zaměřit se na vstupní materiály při použití této technologie, především na kvalitu používaného R-materiálu.

V teoretické části bylo zjištěno, že technologie studených recyklací jsou nejvíce používány na velmi porušených komunikacích především III. tříd. Při provádění údržby či rekonstrukce těchto komunikací se běžně používá technologie recyklace za studena na místě. Výhodou této technologie je rychlé a kvalitní opravení vozovek a také možnost pasivace dehtového pojiva v původní konstrukci vozovky. Nevýhodou této technologie je použití složitější mechanizace. Naopak výhodou technologie recyklace za studena v míchacím centru je použití běžné mechanizace pro pokládku směsí a využití již odfrézovaného R-materiálu. Dominantním vstupním materiálem při použití technologie recyklace za studena, jak na místě tak v míchacím centru, je R-materiál. Pro požadovanou kvalitu výsledných studených asfaltových směsí, je důležité sledovat během výroby těchto směsí kvalitu R-materiálu. Důležitá je jeho homogenita, tu lze ovlivnit především při výrobě R-materiálu. Lepší homogenita je docílena při vybourávání desek, z původní konstrukce vozovky, a jejich následným drcením a tříděním materiálu. Při této výrobě vznikají zrna kameniva obalená zbytkovým pojivem. Při frézování krytových vrstev ve slabých vrstvách mohou vznikat oválná zploštělá zrna, která mohou být drcena při hutnění pokládané směsi. Další důležitou vlastností je obsah zbytkového asfaltového pojiva v R-materiálu a jeho vlastnosti, především penetrace a bod měknutí. Vlivem oxidací maltenů v asfaltu, asfaltové pojivo stárne a při tomto stárnutí se mění jeho visko-elastické vlastnosti. Asfalt se stává křehčí a tvrdší. Další významnou vlastností R-materiálu je jeho vlhkost, právě ta rozhoduje o dávkovaném množství do horkých asfaltových směsí v šaržových obalovnách bez paralelního bubnu. Dávkování R-materiálu do jisté míry nepřímo roste s rostoucí vlhkostí. Vlhkost R-materiálu je možno ovlivnit vhodným skladováním, např. v zastřešené hale.

Praktická část

Cílem praktické části bylo zjistit vybrané vlastnosti použitého R-materiálu. Dále bylo cílem navrhnout vhodnou recepturu studené asfaltové směsi pro podkladní vrstvy málo zatížených vozovek. Vlastnosti jednotlivých studených asfaltových směsí měli být ověřeny v souladu s technickými podmínky TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena. Dále mělo být provedeno experimentální měření vybraných směsí s použitím funkčních zkoušek. Dále bylo snahou vyzkoušet účinnost dostupných přísad (rejuvenátorů) za běžných teplot (do 60 °C), které svými chemickými vlastnosti upravují vlastnosti degradovaného asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálu.

Použité materiály

Kamenivo:	R-materiál frakce 0/16 mm (Jihomoravská obalovna s.r.o. - Rajhradice) Označení dle ČSN EN 13108-8: 22 RA 0/16
Pojivo:	Asfaltová emulze Paramo KATEBIT C 65 B 3 Cement směsný CEM V/A (S-V) 32,5 R
Přísady:	Paramo Reju 553, Paramo Reju 182, Paramo Reju 161

Závěrem praktické části práce jsou naměřené výsledky shrnuty do několika bodů:

Vlastnosti R-materiálu

Onačení dle ČSN EN 13108 – 8:	22 RA 0/16
Průměrný obsah jemných částic:	f = 0,1 %
Průměrný obsah zbytkového asfaltového pojiva:	S = 5,4 %
Frakce kameniva po extrakci	0/16 mm
Průměrný obsah jemných částic kameniva po extrakci	f = 9,2 %
Penetrace zbytkového asfaltového pojiva:	18 p.j.
Bod měknutí zbytkového asfaltového pojiva:	64,6 °C
Maximální objemová hmotnost	$\rho_{mv} = 2\,508\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Maximální suchá objemová hmotnost	$\rho_d = 2\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Optimální vlhkost	w_{opt} = 3,0 %

Použitý R-materiál v praktické části práce byl frakce 0/16 mm, s maximální velikostí zrna 22 mm. Obsah jemných částic R-materiálu je velice nízký, $f = 0,1\%$, to je pro R-materiál typické. Zbytkové pojivo v R-materiálu je vlivem oxidace velice zestárlé a tvrdé. Frakce kameniva po extrakci pojiva byla 0/16 mm. Křivky zrnitosti kameniva po extrakci byly téměř totožné a měly parabolický tvar. Z těchto poznatků lze usoudit, že byl použitý R-materiál homogenní. Také lze usuzovat, že při výrobě R-materiálu nebyla drcena zrna kostry kameniva v původní asfaltové směsi. Vzhledem k frakci kameniva a průběhu křivky zrnitosti (parabolický tvar) lze očekávat, že původní asfaltová směs byla typu asfaltový beton pro podkladní nebo ložné vrstvy vozovky. Při zjišťování zhutnitelnosti R-materiálu se ukázalo, že rázová metoda (Proctor modifikovaný) a vibrační metoda (vibrační pěch) nejsou pro hutnění vhodné. R-materiál je hrubozrnný s malým obsahem jemných částic. Při rázovém, nebo vibračním hutnění, se zrna nejsou schopna do sebe dostatečně zaklínit. Při hutnění R-materiál těmito metodami jednotlivá zrna odskakovala a vylétávala ven z formy, ale také z formy vytékala přebytečná voda. Z těchto důvodů nebylo možné stanovit zhutnitelnost pomocí doporučené metody uvedené v TP 208, Proctorem modifikovaný. **Zhutnitelnost R-materiálu byla zjištěna pomocí statického lisování.** Maximální suchá objemová hmotnost $\rho_d = 2\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ byla dosažena při optimální vlhkosti $w_{opt} = 3,0\%$.

Průkazní zkoušky studených asfaltových směsí

Mezi průkazní zkoušky navržených směsí byly zařazeny tyto zkoušky: mezerovitost, stanovení pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě na zkušebních tělesech. Navržených 8 studených asfaltových směsí bylo vyráběno při teplotě **20 °C** (laboratorní teplota). Dále 5 směsí bylo vyráběno za zvýšené teploty **60 °C**. **Celkem tedy 13 studených asfaltových směsí.** Z naměřených výsledků je zřejmé, že zvýšením teploty při výrobě směsí o 40 °C (na 60 °C) docílíme nižší mezerovitosti, avšak pevnost v příčném tahu těchto směsí není vyšší natolik, aby bylo zahřívání efektivní. **Dále je z naměřených výsledků zkoušky pevnosti v příčném tahu (R_t) zjevné, že směsi s rejuvenátory nedosáhli požadované pevnosti ($R_{it, min} = 0,30\text{ MPa}$).** Proto lze usoudit, že běžné rejuvenátory používané do horkých asfaltových směsí nejsou pro studené asfaltové směsi vhodné. Pro oživení zestárlého asfaltového pojiva je pravděpodobně zapotřebí vyšší teplota jak 60 °C.

Z naměřených výsledků při průkazných zkouškách studených asfaltových směsí je patrné, že jediná vhodná receptura směsi pro podkladní vrstvy málo zatížených vozovek je ta s pracovním označením AEC2, vyráběna a hutněna při teplotě 20 °C. Receptura této směsi, byla navržena podle dosavadních zkušeností při provádění technologie recyklace za studena na místě s použitím kombinace dvou pojiv, asfaltové emulze a cementu. Cílem zařazení této směsi do laboratorního měření bylo získání tzv. referenčních výsledků. K těmto výsledkům byly ostatní výsledky dalších směsí vztaženy pro porovnání.

Experimentální měření vybraných směsí

Pro experimentální měření byly vybrány tyto směsi: AE, AEC1 a AEC2. Tyto směsi byly zvoleny záměrně pro sledování vlivu cementu na studenou asfaltovou směs. Při experimentálním měření byly zjištěny další charakteristiky studených asfaltových směsí. Pevnost v tlaku a modul pružnosti. Z naměřených hodnot pevností v tlaku je dle očekávání patrné, že s rostoucím dávkováním cementu do směsi roste i pevnost v tlaku. Zároveň studené asfaltové směsi stmelené kombinací asfaltové emulze a cementu ztrácejí pružnost a jsou více křehké, než směsi stmelené pouze asfaltovou emulzí. Moduly pružnosti směsí byly stanoveny cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji. **Naměřené hodnoty modulů pružnosti vybraných směsí jsou cca $E_r \approx 650$ MPa.** Uváděný návrhový modul pružnosti mechanicky zpevněného kameniva (MZK) je $E_r = 600$ MPa. **Zkoušené studené asfaltové směsi, naměřenými moduly pružnosti, odpovídají nejkvalitnější nestmelené směsi pro podkladní vrstvy vozovek (MZK).** Ze získaných hodnot modulů pružnosti nelze stanovit korelaci mezi modulem pružnosti a množstvím cementu ve studených asfaltových směsí. Pro stanovení této korelace by bylo zapotřebí provést další měření, například na tělesech s různou dobou zrání (pro sledování vlivu hydratace cementu ve směsi). Také by bylo vhodné měření provádět na více zkušebních těles, pro snížení odchylek při měření.

Vlastnosti směsi AEC2 (teplota výroby a hutnění směsi 20 °C)

Tab. 5.1 - Receptura směsi AEC2

Označení směsi	Kamenivo		Pojivo		Příspěvky	
AEC2	R-mat 0/16	100 %	Katebit C 65 B 3	2 % hm.	-	-
			CEM V/A 32,5 R	3 % hm.	-	-

Mezerovitost:

$V_m = 11,8$ %

Pevnost v příčném tahu po 7 dnech:

$R_{it} = 0,37$ MPa

Odolnost proti vodě (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě):

145,9 % pevnosti R_{it}

Pevnost v tlaku (28 denní)

2,12 MPa

Modul pružnosti (28 denní) - svislé napětí $\sigma_1 = 450$ kPa:

651,0 MPa

Modul pružnosti (28 denní) - svislé napětí $\sigma_1 = 625$ kPa:

685,8 MPa

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Normy a technické podmínky:

- [1] Technické podmínky TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena.
- [2] Technické podmínky TP 210 – Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací.
- [3] ČSN EN 13108 – 8 – Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál
- [4] ČSN EN 933 – 1 – Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor.
- [5] ČSN EN 12697 – 1 – Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 1: Obsah rozpuštěného pojiva
- [6] ČSN EN 12697 – 5 – Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti
- [7] ČSN EN 13286 – 2 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška
- [8] ČSN EN 13286 – 51 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 51: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí vibračního pěchu.
- [9] ČSN EN 13286 – 53 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 53: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí osového tlaku.
- [10] ČSN EN 13286 – 42 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 42: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsí stmelených hydraulickými pojivy.
- [11] ČSN EN 13286 – 41 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy.
- [12] ČSN EN 13614 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení přilnavosti asfaltových emulzí zkouškou ponořením do vody.
- [13] ČSN EN 12697 – 3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.
- [14] ČSN EN 1426 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.
- [15] ČSN EN 1427 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička.
- [16] ČSN EN 13286 – 7 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji.

Ostatní literatura:

- [17] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. 392 s. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [18] ČESKOMORAVSKÝ CEMENT. *Příručka technologa - beton: suroviny, výroba, vlastnosti* [online]. Aktualizace 1. vyd. 2013 [cit. 2015-12-02]. 292 s. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203> .
- [19] *Paramo Eshop: protokol o zkoušce č. 51123* [online]. 2013 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/protokol_R65.pdf
- [20] *Constrols Group* [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.controls-group.com/eng/bitumen-testing-equipment/standard-tar-viscometer.php>
- [21] *Pavement interactive* [online]. 2012 [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <http://www.pavementinteractive.org/article/pressure-aging-vessel/>
- [22] *SAT s.r.o.* [online]. [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <http://www.satsro.cz/>
- [23] *Asfalt: strojně mechanikou firmy Wacker* [online]. 2008 [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <http://www.asfalt.cz/rezani-a-bourani-asfaltovych-povrchu>
- [24] *Beton server: Eurovia CS a.s.* [online]. 2006 [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <http://www.betonserver.cz/eurovia-cs-skladka>
- [25] ŠINDELÁŘOVÁ, Tereza. *Využití rejuvenátorů v asfaltových směsích s R-materiálem*. Praha, 2013. 144 s., 41 s. příl. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D.
- [26] BUŠINA, Filip a Martin NEUVIRT. *Recyklace vozovek - recyklace za studena. ASB-portal.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/doprava/rekonstrukce-vozovek-recyklace-za-studena>
- [27] *Wirtgen-group: Our Technologies* [online]. 2015 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www.wirtgen-group.com/en/technologies/road-rehabilitation/cold-recycling-plant/>
- [28] *Roadtec: an Astec Industries Company* [online]. 2015 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www.roadtec.com/products/cold-in-place-recycling/rt-500>
- [29] SUITS, L. David. *Asphalt Emulsion Technology. Transportation research circular E-C102* [online]. August 2006 [cit. 2015-12-07]. 49 s. ISSN 0097-8515. Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec102.pdf>
- [30] VARAUS, Michal. *Prezentace - Pozemní komunikace II: Recyklace netuhých vozovek*. VUT Brno, 2013.

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 - Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro stmelené vrstvy [1, s. 8]....	21
Tab. 3.2 - Požadavky na recyklované stmelené směsi [1, s. 10]	21
Tab. 3.3 - Třídy štěpitelnosti asfaltové emulze [17, s. 119]	25
Tab. 4.1 - Extrakce pojiva z R-materiálu	34
Tab. 4.2 - Penetrace jehlou	37
Tab. 4.3 - Bod měknutí.....	38
Tab. 4.4 - Maximální objemová hmotnost R-materiálu	40
Tab. 4.5 - Receptury navržených směsí.....	49
Tab. 4.6 - Objemová hmotnost směsí.....	53
Tab. 4.7 - Mezerovitost směsí	54
Tab. 4.8 - Pevnost v příčném tahu	56
Tab. 4.9 - Odolnost proti vodě.....	60
Tab. 4.10 - Pevnost v tlaku (28 denní)	64
Tab. 4.11 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B – úroveň nízké napětí)	69
Tab. 4.12 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B – úroveň vysokého napětí).....	70
Tab. 5.1 - Receptura směsi AEC2	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1 - Schéma činnosti recyklační frézy [17, s. 232]	13
Obr. 3.2 - Recyklace podkladních vrstev s použitím pojiva [27]	14
Obr. 3.3 - Recyklace asfaltových vrstev za studena [28]	14
Obr. 3.4 - Recyklace na místě s použitím cementu – dávkování před recyklační frézu [26].....	15
Obr. 3.5 - Recyklace na místě s použitím cementu – vstřikování cementové suspenze do recyklační frézy [26]	15
Obr. 3.6 - Recyklace na místě s použitím asfaltové emulze – dávkování emulze do recyklační frézy [26]	16
Obr. 3.7 - Recyklace na místě s použitím asfaltové emulze/pěnoasfaltu + cementu – dávkování pojiv do mísícího zařízení [26].....	16
Obr. 3.8 - Mobilní míchací zařízení [27].....	17
Obr. 3.9 - Recyklace v centru [27]	17
Obr. 3.10 - Vybourávání asfaltových vrstev vozovky [23]	19
Obr. 3.11 - Drcení R-materiálu [24]	19
Obr. 3.12 - Frézování vozovky [22]	20
Obr. 3.13 - Typy emulzí [29, s. 2]	22
Obr. 3.14 - Koloidní mlýn a schéma kontinuálního míchacího zařízení [17, s. 117].....	23
Obr. 3.15 - Ionizace částic asfaltu kationaktivní emulze působením emulgátoru [29, s. 8].....	23
Obr. 3.16 - Fáze štěpení kationaktivní asfaltové emulze [29, s. 12]	24
Obr. 3.17 - Typické příklady částečně obalených zrn kameniva [12, s. 8]	24
Obr. 3.18 - Standard Tar Viscometer – STV [20]	25
Obr. 3.19 - Pressurized Aging Vessel - PAV [21]	28
Obr. 3.20 - Paramo Reju 553, Paramo Reju 182, Paramo Reju 161	29
Obr. 4.1 - R-mat 0/16	30
Obr. 4.2 - Prosévací přístroj	31
Obr. 4.3 - Přístroj na extrakci pojiva	33

Obr. 4.4 - Destilační zařízení.....	36
Obr. 4.5 - Penetrometr.....	37
Obr. 4.6 - Metoda kroužek a kulička.....	38
Obr. 4.7 - Pyknometr.....	39
Obr. 4.8 - Vývěva.....	39
Obr. 4.9 - Proctor modifikovaný.....	42
Obr. 4.10 - Problém při hutnění.....	42
Obr. 4.11 - Vibrační pěch.....	44
Obr. 4.12 - Hutnicí lis.....	46
Obr. 4.13 - Lis na vytlačení tělesa z formy.....	46
Obr. 4.14 - Přehled navržených směsí.....	49
Obr. 4.15 - Přehled zkušebních těles hutněných při teplotě 20 °C.....	54
Obr. 4.16 - Pevnost v příčném tahu R_{it}	55
Obr. 4.17 - Přehled vybraných směsí pro další zkoušení.....	57
Obr. 4.18 - Směs AE - porušené těleso při zkoušce R_{it}	58
Obr. 4.19 - Směs R553 - porušené těleso při zkoušce R_{it}	58
Obr. 4.20 - Směs R182 - porušené těleso při zkoušce R_{it}	58
Obr. 4.21 - Směs R161 - porušené těleso při zkoušce R_{it}	58
Obr. 4.22 - Směs AER - porušené těleso při zkoušce R_{it}	59
Obr. 4.23 - Směs AE60 - porušené těleso při zkoušce R_{it}	59
Obr. 4.24 - Směs AEC1 - porušené těleso při zkoušce R_{it}	59
Obr. 4.25 - Směs AEC2 - porušené těleso při zkoušce R_{it}	59
Obr. 4.26 - Pevnost v tlaku R_c	63
Obr. 4.27 - Směs AE - porušené těleso při zkoušce R_c	65
Obr. 4.28 - Směs AEC1 - porušené těleso při zkoušce R_c	65
Obr. 4.29 - Směs AEC2 - porušené těleso při zkoušce R_c	65
Obr. 4.30 - Zatěžovací schéma.....	66
Obr. 4.31 - Triaxiální přístroj.....	66

SEZNAM GRAFŮ

Graf 4.1 - Zrnitost R-materiálu.....	32
Graf 4.2 - Zrnitost R-materiálu (kamenivo).....	35
Graf 4.3 - Zhutnitelnost R-materiálu.....	41
Graf 4.4 - Zhutnitelnost R-materiálu - Proctor modifikovaný.....	43
Graf 4.5 - Zhutnitelnost R-materiálu - Vibrační pěch.....	45
Graf 4.6 - Zhutnitelnost R-materiálu - Lisování.....	47
Graf 4.7 - Zhutnitelnost směsi AEC2.....	50
Graf 4.8 - Srovnání objemových hmotností směsí při různých teplotách hutnění.....	53
Graf 4.9 - Srovnání mezerovitosti směsí při různých teplotách hutnění.....	54
Graf 4.10 - Srovnání pevností v příčném tahu při různých teplotách hutnění.....	56
Graf 4.11 - Srovnání pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě.....	61
Graf 4.12 - Porovnání pevnosti v tlaku (28 denní).....	64
Graf 4.13 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B - úroveň nízkého napětí).....	69
Graf 4.14 - Srovnání modulů pružnosti (metoda B - úroveň vysokého napětí).....	70

SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1 - Procento zůstatku materiálu	32
Rovnice 2 - Součtové procento propadu	32
Rovnice 3 - Obsah jemných částic	32
Rovnice 4 - Obsah zbytkového pojiva.....	34
Rovnice 5 - Maximální objemová hmotnost	40
Rovnice 6 - Objemová hmotnost vlhkého materiálu	43
Rovnice 7 - Vlhkost vzorku.....	43
Rovnice 8 - Objemová hmotnost zhutněného suchého materiálu	43
Rovnice 9 - Množství R-materiálu	51
Rovnice 10 - Množství vody	51
Rovnice 11 - Množství pojiva a přísad.....	51
Rovnice 12 - Objemová hmotnost směsi zkušebního tělesa	52
Rovnice 13 - Mezerovitost směsi zkušebního tělesa	52
Rovnice 14 - Pevnost v příčném tahu R_{it}	56
Rovnice 15 - Pevnost v tlaku R_c	64
Rovnice 16 - Deviator napětí.....	67
Rovnice 17 - Poměrné přetvoření při zatížení	67
Rovnice 18 - Poměrné přetvoření při odtížení	68
Rovnice 19 - Pružné poměrné přetvoření	68
Rovnice 20 - Svislé napětí při zatížení	68
Rovnice 21 - Svislé napětí při odtížení	68
Rovnice 22 - Svislé napětí.....	68
Rovnice 23 - Modul pružnosti.....	68

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ACL	asfaltový beton pro ložní vrstvy
ACP	asfaltový beton pro podkladní vrstvy
VMT	asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti
MZK	mechanicky zpevněné kamenivo
TDZ	třída dopravního zatížení
p.j.	penetrační jednotky
SO ₃	oxid sírový
ρ_{mv}	maximální objemová hmotnost
ρ_d	suchá objemová hmotnost zhutněného materiálu
ρ_w	hustota vody při zkušební teplotě
V _p	objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce
S	obsah zbytkového pojiva
W	vlhkost
w _{opt}	optimální vlhkost
ρ	objemová hmotnost směsi
f	obsah jemných částic menších než 0,063 mm
I _p	kvalita jemných částic
V _m	mezerovitost směsi
R _{it}	pevnost v příčném tahu
R _c	pevnost v prostém tlaku
E _r	modul pružnosti
σ_d	deviátor napětí
σ_1	hlavní (svislé) napětí
σ_3	komorový tlak
ϵ	poměrné přetvoření
R ²	spolehlivost regrese

SEZNAM PŘÍLOH

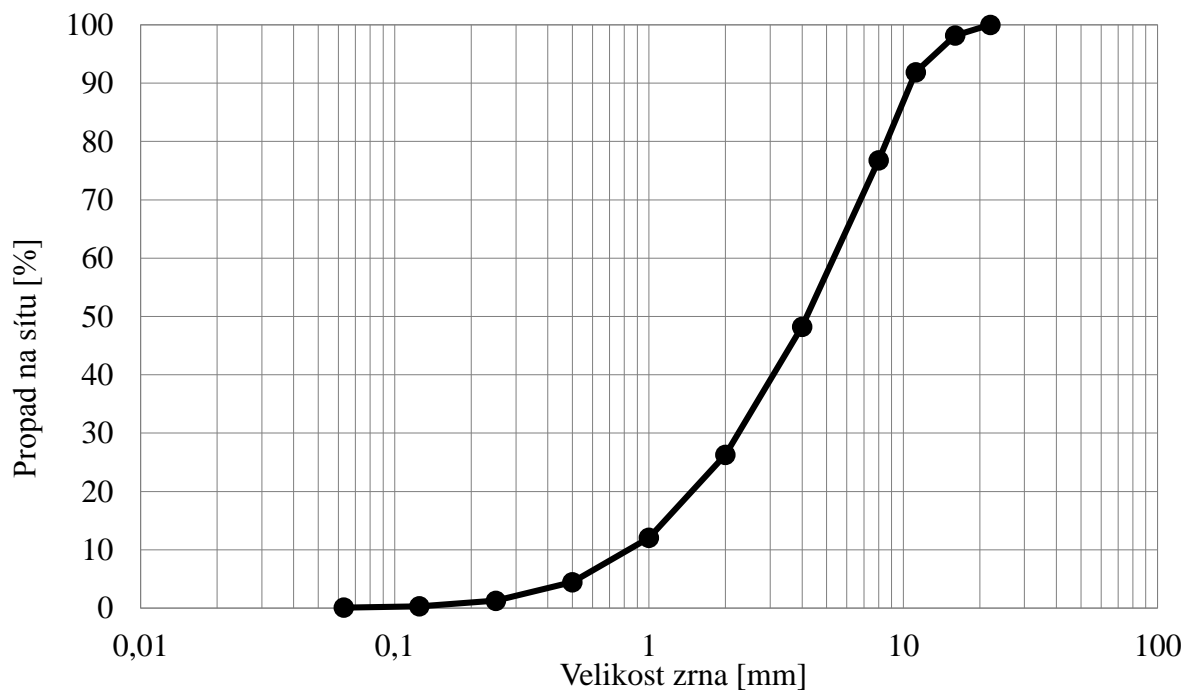
PŘÍLOHA A - Zrnitost R-materiálu 0/16.....	81
PŘÍLOHA B - Zrnitost R-materiálu 0/16 (kamenivo)	83
PŘÍLOHA C - Zhutnitelnost R-materiálu	85
PŘÍLOHA D - Zhutnitelnost směsi AEC2	88
PŘÍLOHA E - Objemová hmotnost a mezerovitost směsí.....	89
PŘÍLOHA F - Pevnost v příčném tahu	91
PŘÍLOHA G - Odolnost proti vodě	99
PŘÍLOHA H - Pevnost v tlaku (28 denní)	101
PŘÍLOHA I - Modul pružnosti (28 denní)	103

PŘÍLOHA A - Zrnitost R-materiálu 0/16

Příloha A1 - Zrnitost R-materiálu 0/16 – 1. vzorek

Velikost síta	Nadsítné	Nadsítné	Celkem nadsítné	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
22	0,0	0,0	0,0	100,0
16	18,5	1,8	1,8	98,2
11,2	63,4	6,3	8,1	91,9
8	152,5	15,1	23,2	76,8
4	287,3	28,5	51,7	48,3
2	221,4	22,0	73,7	26,3
1	143,6	14,2	87,9	12,1
0,5	76,7	7,6	95,5	4,5
0,25	32,3	3,2	98,7	1,3
0,125	9,6	1,0	99,7	0,3
0,063	2,3	0,2	99,9	0,1
0	0,9	0,1	100,0	0,0
suma	1008,5	100,0		

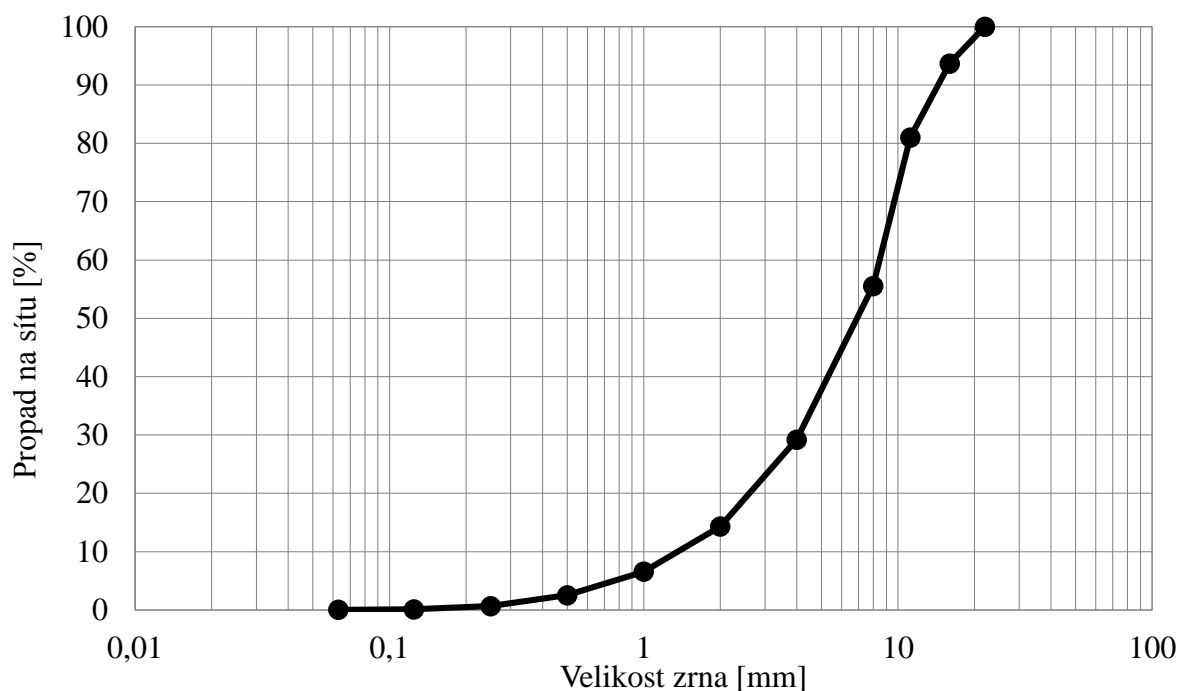
Obsah jemných částic $f = 0,1 \%$.



Příloha A2 - Zrnitost R-materiálu 0/16 – 2. vzorek

Velikost síta	Nadsítné	Nadsítné	Celkem nadsítné	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
22	0,0	0,0	0,0	100,0
16	63,5	6,3	6,3	93,7
11,2	127,6	12,7	19,0	81,0
8	256,0	25,5	44,5	55,5
4	265,0	26,3	70,8	29,2
2	149,7	14,9	85,7	14,3
1	77,9	7,7	93,4	6,6
0,5	40,6	4,0	97,5	2,5
0,25	18,8	1,9	99,3	0,7
0,125	5,4	0,5	99,9	0,1
0,063	0,9	0,1	100,0	0,0
0	0,3	0,0	100,0	0,0
suma	1005,7	100,0		

Obsah jemných částic $f = 0,03 \%$.

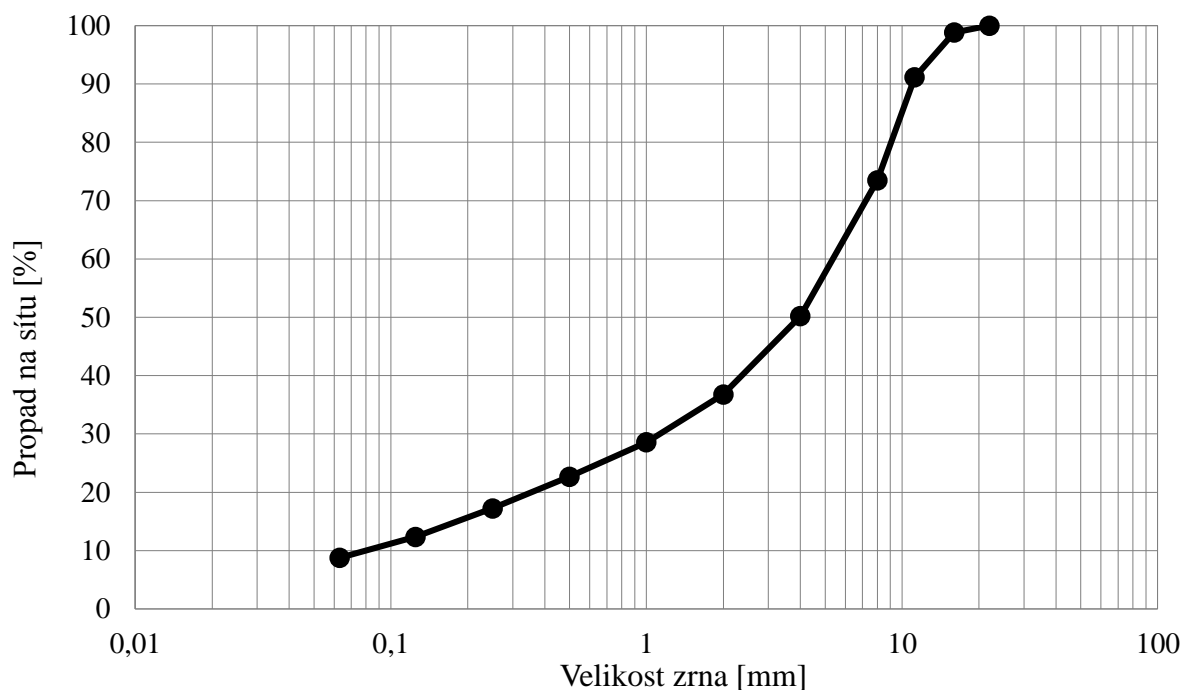


PŘÍLOHA B - Zrnitost R-materiálu 0/16 (kamenivo)

Příloha B1 - Zrnitost R-materiálu 0/16 (kamenivo) - 1. vzorek

Velikost síta	Nadsítné	Nadsítné	Celkem nadsítné	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
22	0,0	0,0	0,0	100,0
16	11,0	1,2	1,2	98,8
11,2	72,9	7,7	8,9	91,1
8	167,1	17,7	26,5	73,5
4	220,3	23,3	49,8	50,2
2	127,1	13,4	63,2	36,8
1	77,7	8,2	71,4	28,6
0,5	55,7	5,9	77,3	22,7
0,25	51,4	5,4	82,7	17,3
0,125	46,3	4,9	87,6	12,4
0,063	34,1	3,6	91,2	8,8
0	83,0	8,8	100,0	0,0
suma	946,6	100,0		

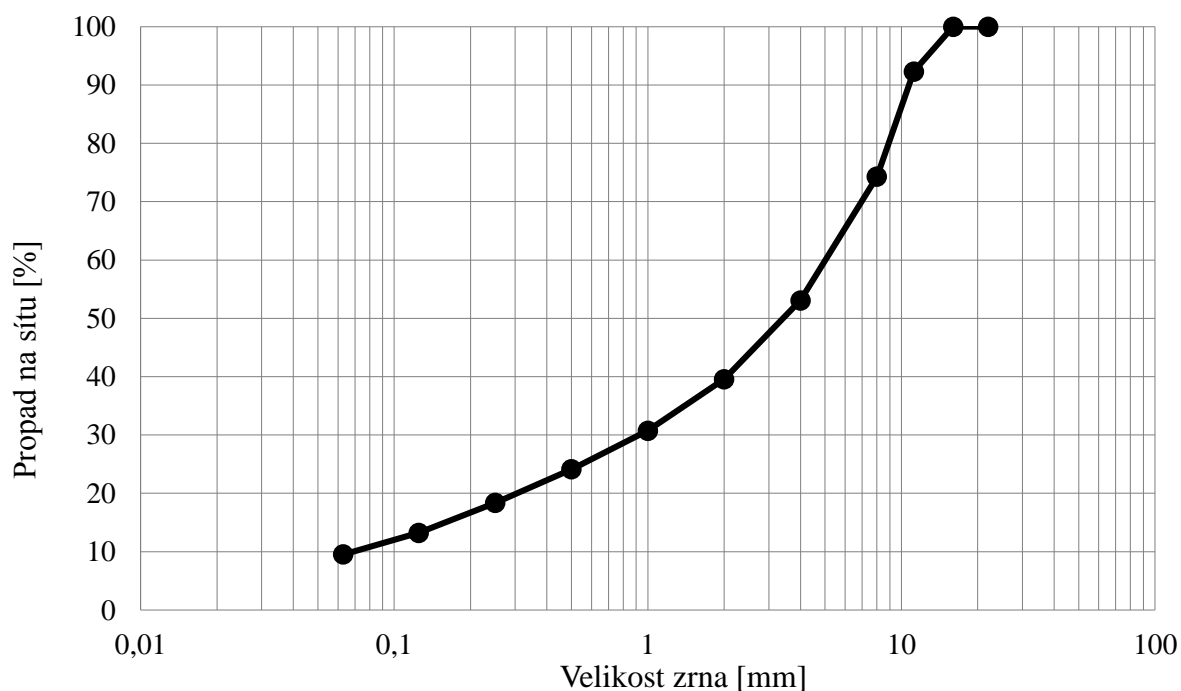
Obsah jemných částic $f = 9,8 \%$.



Příloha B2 - Zrnitost R-materiálu 0/16 (kamenivo) - 2. vzorek

Velikost síta	Nadsítné	Nadsítné	Celkem nadsítné	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
22	0,0	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	0,0	100,0
11,2	72,6	7,7	7,7	92,3
8	170,5	18,0	25,7	74,3
4	200,7	21,2	46,9	53,1
2	127,7	13,5	60,4	39,6
1	83,5	8,8	69,3	30,7
0,5	62,4	6,6	75,9	24,1
0,25	54,7	5,8	81,6	18,4
0,125	48,4	5,1	86,8	13,2
0,063	35,0	3,7	90,5	9,5
0	90,2	9,5	100,0	0,0
suma	945,7	100,0		

Obsah jemných částic $f = 9,5 \%$.



PŘÍLOHA C - Zhutnitelnost R-materiálu

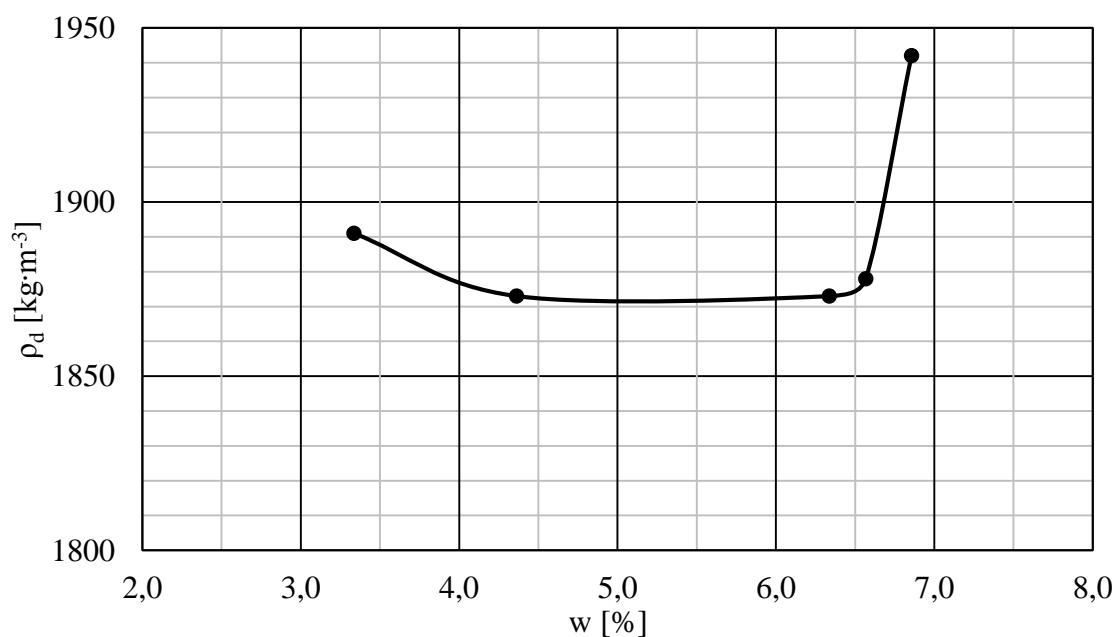
Příloha C1 – Zhutnitelnost R-materiálu – Proctor modifikovaný

Forma A (h = 120 mm, d = 100 mm)

Hmotnost formy a základní desky $m_1 = 6,522$ kg

Objem formy $V = 942$ cm³

Hmotnost formy a materiálu	Hmotnost materiálu	Hmotnost vlhkého materiálu	Hmotnost suchého materiálu	Vlhkost	Průměrná vlhkost	Objemová hmotnost vlhkého materiálu	Objemová hmotnost suchého materiálu
[kg]	[kg]	[g]	[g]	[%]	[%]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]
8,363	1,841	58,4	56,5	3,4	3,3	1 954	1 891
		59,3	57,4	3,3			
8,364	1,842	51,8	49,8	4,0	4,4	1 955	1 873
		55,6	53,1	4,7			
8,407	1,885	58,8	55,3	6,3	6,6	2 001	1 878
		56,5	52,9	6,8			
8,477	1,955	52,6	49,0	7,3	6,9	2 075	1 942
		51,8	48,7	6,4			
8,398	1,876	60,9	57,5	5,9	6,3	1 992	1 873
		52,1	48,8	6,8			



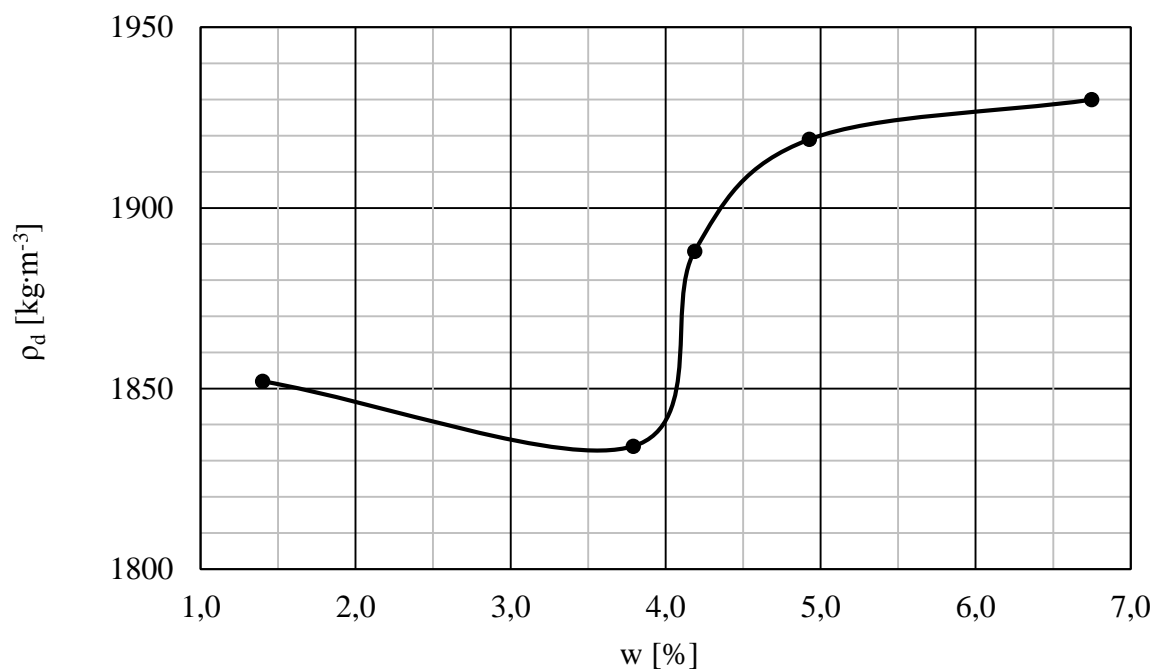
Příloha C2 – Zhutnitelnost R-materiálu – Vibrační pěch

Forma (h = 100 mm, d = 100 mm)

Hmotnost formy a základní desky $m_1 = 5,443 \text{ kg}$

Objem formy $V = 785 \text{ cm}^3$

Hmotnost formy a materiálu	Hmotnost materiálu	Hmotnost vlhkého materiálu	Hmotnost suchého materiálu	Vlhkost	Průměrná vlhkost	Objemová hmotnost vlhkého materiálu	Objemová hmotnost suchého materiálu
[kg]	[kg]	[g]	[g]	[%]	[%]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]
6,917	1,474	38,4	38,1	0,8	1,4	1 878	1 852
		45,6	44,7	2,0			
6,938	1,495	41,7	40,3	3,5	3,8	1 904	1 834
		45,6	43,8	4,1			
6,987	1,544	49,9	47,7	4,6	4,2	1 967	1 888
		52,4	50,5	3,8			
7,024	1,581	50,9	48,4	5,2	4,9	2 014	1 919
		49,1	46,9	4,7			
7,060	1,617	54,4	51,5	5,6	6,7	2 060	1 930
		48,0	44,5	7,9			



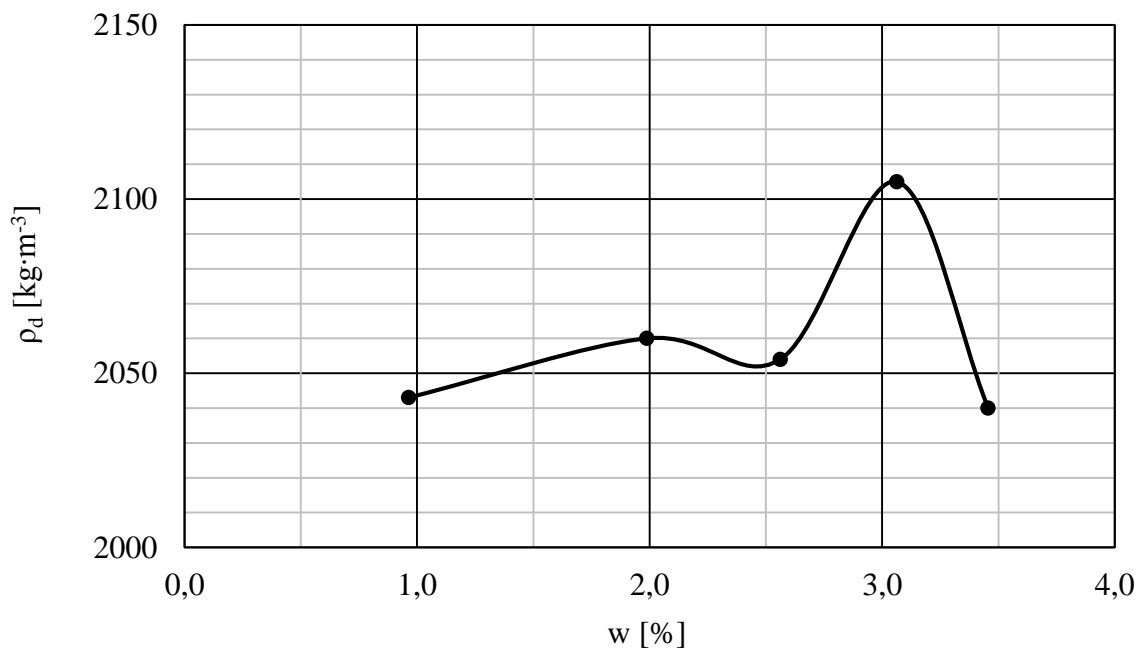
Příloha C3 – Zhutnitelnost R-materiálu – Lisování

Forma (h = 120 mm, d = 100 mm)

Hmotnost formy a základní desky $m_1 = 5,713$ kg

Objem formy $V = 942$ cm³

Hmotnost formy a materiálu	Hmotnost materiálu	Hmotnost vlhkého materiálu	Hmotnost suchého materiálu	Vlhkost	Průměrná vlhkost	Objemová hmotnost vlhkého materiálu	Objemová hmotnost suchého materiálu
[kg]	[kg]	[g]	[g]	[%]	[%]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]
7,656	1,943	64,8	64,1	1,1	1,0	2 063	2 043
		60,3	59,8	0,8			
7,692	1,979	60,1	58,7	2,4	2,0	2 101	2 060
		51,1	50,3	1,6			
7,698	1,985	65,4	63,8	2,5	2,6	2 107	2 054
		54,9	53,5	2,6			
7,756	2,043	64,7	62,8	3,0	3,1	2 169	2 105
		63,2	61,3	3,1			
7,701	1,988	66,5	64,3	3,4	3,5	2 110	2 040
		77,1	74,5	3,5			



PŘÍLOHA D - Zhutnitelnost směsi AEC2

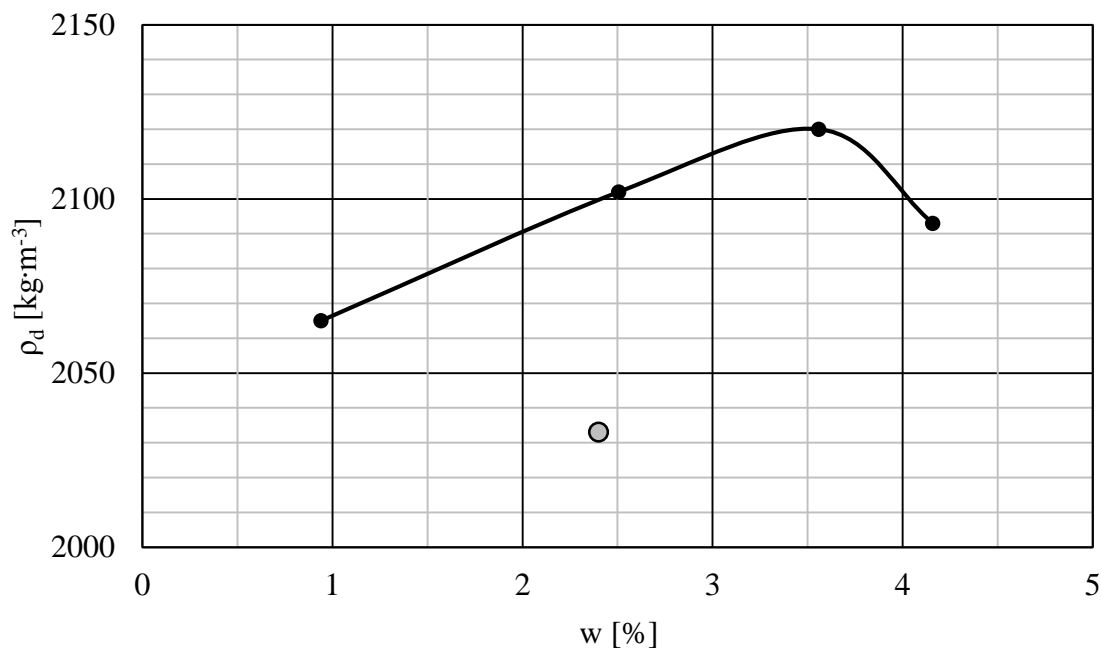
Příloha D1 – Zhutnitelnost směsi AEC2 – Lisování

Forma (h = 100 mm, d = 100 mm)

Hmotnost formy a základní desky $m_1 = 6,514$ kg

Objem formy $V = 942$ cm³

Hmotnost formy a materiálu	Hmotnost materiálu	Hmotnost vlhkého materiálu	Hmotnost suchého materiálu	Vlhkost	Průměrná vlhkost	Objemová hmotnost vlhkého materiálu	Objemová hmotnost suchého materiálu
[kg]	[kg]	[g]	[g]	[%]	[%]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]
8,477	1,963	48,4	47,9	1,0	0,9	2 084	2 065
		48,3	47,9	0,8			
8,474	1,960	48,1	47,2	1,9	2,4	2 081	2 033
		54,5	53,0	2,8			
8,544	2,030	66,7	65,1	2,5	2,5	2 155	2 102
		56,2	54,8	2,6			
8,582	2,068	59,5	57,6	3,3	3,6	2 195	2 120
		57,1	55,0	3,8			
8,568	2,054	61,9	59,5	4,0	4,2	2 180	2 093
		63,3	60,7	4,3			



Pozn.: Jeden vzorek byl pro velkou odchylku z měření vyřazen. V tabulce a v grafu je označený šedou barvou.

PŘÍLOHA E - Objemová hmotnost a mezerovitost směsí

Příloha E1 – Objemová hmotnost a mezerovitost směsí při teplotě hutnění 20 °C

Průměr těles d = 100 mm

Maximální objemová hmotnost R-mat (0/16) $\rho_{mv}=2\,508\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Hmotnost tělesa	Výška tělesa	Objem tělesa	Objemová hmotnost	Průměrná objemová hmotnost	Mezer.	Průměrná mezerovitost
[-]	[-]	[g]	[mm]	[cm ³]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]	[%]	[%]
AE	AE.1	1 694,1	102,0	801,1	2 114,7	2 129	15,7	15,1
	AE.2	1 702,1	102,0	801,1	2 124,7		15,3	
	AE.3	1 704,6	101,0	793,3	2 148,9		14,3	
R553	553.1	1 708,5	101,0	793,3	2 153,8	2 153	14,1	14,2
	553.2	1 707,0	102,0	801,1	2 130,8		15,0	
	553.3	1 707,5	100,0	785,4	2 174,1		13,3	
R182	182.1	1 706,7	102,0	801,1	2 130,4	2 110	15,1	15,9
	182.2	1 706,3	104,0	816,8	2 089,0		16,7	
	182.3	1 706,6	103,0	809,0	2 109,6		15,9	
R161	161.1	1 705,1	105,0	824,7	2 067,6	2 103	17,6	16,1
	161.2	1 707,6	101,0	793,3	2 152,7		14,2	
	161.3	1 706,7	104,0	816,8	2 089,5		16,7	
AER	AER.1	1 704,9	105,0	824,7	2 067,4	2 098	17,6	16,3
	AER.2	1 709,7	102,0	801,1	2 134,2		14,9	
	AER.3	1 709,3	104,0	816,8	2 092,6		16,6	
AEC1	C1.1	1 736,8	103,0	809,0	2 147,0	2 138	14,4	14,7
	C1.2	1 746,8	104,0	816,8	2 138,6		14,7	
	C1.3	1 739,3	104,0	816,8	2 129,4		15,1	
AEC2	C2.1	1 780,2	102,0	801,1	2 222,2	2 212	11,4	11,8
	C2.2	1 778,9	103,0	809,0	2 199,0		12,3	
	C2.3	1 775,5	102,0	801,1	2 216,3		11,6	
AE60	AE60.1	1 700,2	104,0	816,8	2 081,5	2 110	17,0	15,9
	AE60.2	1 711,4	101,0	793,3	2 157,4		14,0	
	AE60.3	1 708,4	104,0	816,8	2 091,5		16,6	

Příloha E2 – Objemová hmotnost a mezerovitost směsí při teplotě hutnění 60 °C

Průměr těles d = 100 mm

Maximální objemová hmotnost R-mat (0/16) $\rho_{mv}=2\,508\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Hmotnost tělesa	Výška tělesa	Objem tělesa	Objemová hmotnost	Průměrná objemová hmotnost	Mezer.	Průměrná mezerovitost
[-]	[-]	[g]	[mm]	[cm ³]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]	[%]	[%]
AE	AE.1	1 697,2	97,0	761,8	2 227,8	2 202	11,2	12,2
	AE.2	1 703,0	100,0	785,4	2 168,3		13,5	
	AE.3	1 717,6	99,0	777,5	2 209,0		11,9	
R553	553.1	1 705,5	99,0	777,5	2 193,4	2 233	12,5	11,0
	553.2	1 704,9	97,0	761,8	2 237,9		10,8	
	553.3	1 710,5	96,0	754,0	2 268,6		9,5	
R182	182.1	1 709,9	97,0	761,8	2 244,4	2 240	10,5	10,7
	182.2	1 701,2	96,0	754,0	2 256,3		10,0	
	182.3	1 708,0	98,0	769,7	2 219,1		11,5	
R161	161.1	1 703,9	96,0	754,0	2 259,9	2 247	9,9	10,4
	161.2	1 708,0	98,0	769,7	2 219,1		11,5	
	161.3	1 704,5	96,0	754,0	2 260,7		9,9	
AER	AER.1	1 706,8	95,0	746,1	2 287,5	2 248	8,8	10,4
	AER.2	1 703,9	97,0	761,8	2 236,6		10,8	
	AER.3	1 709,3	98,0	769,7	2 220,8		11,5	

PŘÍLOHA F - Pevnost v příčném tahu

Příloha F1 – Pevnost v příčném tahu R_{it} při teplotě hutnění 20 °C

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Datum výroby	Hmotnost výroba	Datum zkoušení	Hmotnost zkoušení	Ztráta hmotnosti	Síla při porušení	Přetvoření	R_{it}	Průměr R_{it}
[-]	[-]	[-]	[g]	[-]	[g]	[%]	[N]	[mm]	[MPa]	[MPa]
AE	AE.1	17. 7. 2015	1 694,1	24. 7. 2015	1 662,4	1,87	8 753	3,43	0,55	0,56
	AE.2	17. 7. 2015	1 702,1	24. 7. 2015	1 671,3	1,81	8 423	2,58	0,53	
	AE.3	17. 7. 2015	1 704,6	24. 7. 2015	1 670,9	1,98	9 439	2,49	0,59	
R553	553.1	17. 7. 2015	1 708,5	24. 7. 2015	1 682,0	1,55	1 764	1,88	0,11	0,12
	553.2	17. 7. 2015	1 707,0	24. 7. 2015	1 672,3	2,03	2 176	2,28	0,14	
	553.3	17. 7. 2015	1 707,5	24. 7. 2015	1 681,2	1,54	1 954	1,81	0,12	
R182	182.1	17. 7. 2015	1 706,7	24. 7. 2015	1 681,6	1,47	693	1,56	0,04	0,05
	182.2	17. 7. 2015	1 706,3	24. 7. 2015	1 679,6	1,56	828	1,86	0,05	
	182.3	17. 7. 2015	1 706,6	24. 7. 2015	1 680,2	1,55	686	1,62	0,04	
R161	161.1	20. 7. 2015	1 705,1	27. 7. 2015	1 667,7	2,19	3 034	1,54	0,18	0,17
	161.2	20. 7. 2015	1 707,6	27. 7. 2015	1 669,5	2,23	2 711	1,86	0,17	
	161.3	20. 7. 2015	1 706,7	27. 7. 2015	1 669,0	2,21	2 727	1,94	0,17	
AER	AER.1	21. 7. 2015	1 704,9	28. 8. 2015	1 674,0	1,81	3 432	2,26	0,21	0,24
	AER.2	21. 7. 2015	1 709,7	28. 8. 2015	1 677,3	1,90	4 415	2,39	0,28	
	AER.3	21. 7. 2015	1 709,3	28. 8. 2015	1 679,8	1,73	3 689	1,91	0,23	

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Datum výroby	Hmotnost výroba	Datum zkoušení	Hmotnost zkoušení	Ztráta hmotnosti	Síla při porušení	Přetvoření	R _{it}	Průměr R _{it}
[-]	[-]	[-]	[g]	[-]	[g]	[%]	[N]	[mm]	[MPa]	[MPa]
AEC1	C1.1	31. 8. 2015	1 736,8	7. 9. 2015	1 716,7	1,16	3 646	1,87	0,23	0,23
	C1.2	31. 8. 2015	1 746,8	7. 9. 2015	1 730,7	0,92	4 130	1,98	0,25	
	C1.3	31. 8. 2015	1 739,3	7. 9. 2015	1 724,7	0,84	3 517	2,03	0,22	
AEC2	C2.1	31. 8. 2015	1 780,2	7. 9. 2015	1 759,0	1,19	5 803	1,93	0,36	0,37
	C2.2	31. 8. 2015	1 778,9	7. 9. 2015	1 757,3	1,21	5 898	2,00	0,36	
	C2.3	31. 8. 2015	1 775,5	7. 9. 2015	1 753,0	1,27	5 910	2,07	0,37	
AE60	AE60.1	21. 7. 2015	1 700,2	28. 8. 2015	1 667,2	1,94	8 942	2,64	0,55	0,54
	AE60.2	21. 7. 2015	1 711,4	28. 8. 2015	1 677,7	1,97	8 898	2,64	0,56	
	AE60.3	21. 7. 2015	1 708,4	28. 8. 2015	1 675,6	1,92	8 338	2,74	0,51	

Příloha F2 – Průběh zkoušky pevnosti v příčném tahu R_{it} při teplotě hutnění 20 °C

Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs AE

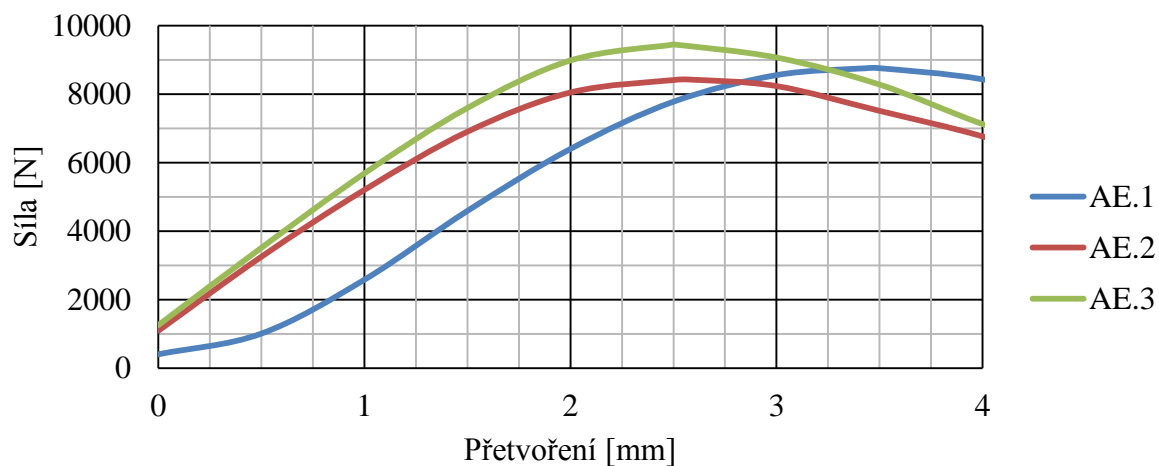


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs R553

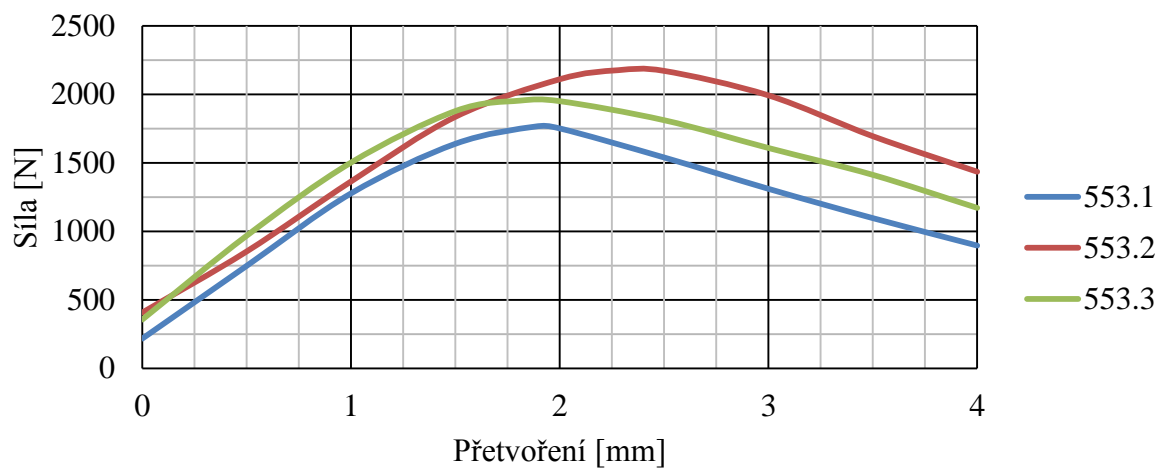
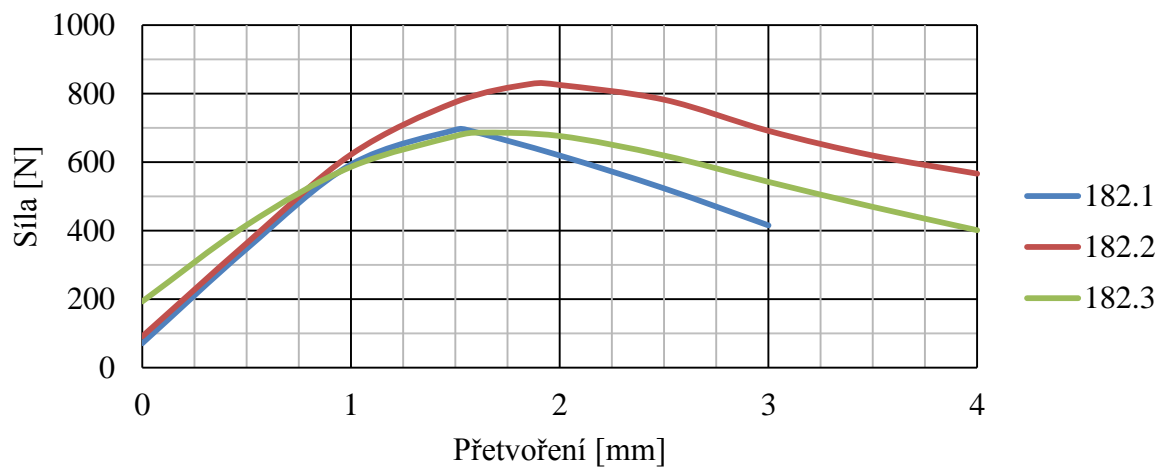


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs R182



Příloha F2 – Průběh zkoušky pevnosti v příčném tahu R_{it} při teplotě hutnění 20 °C

Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs R161

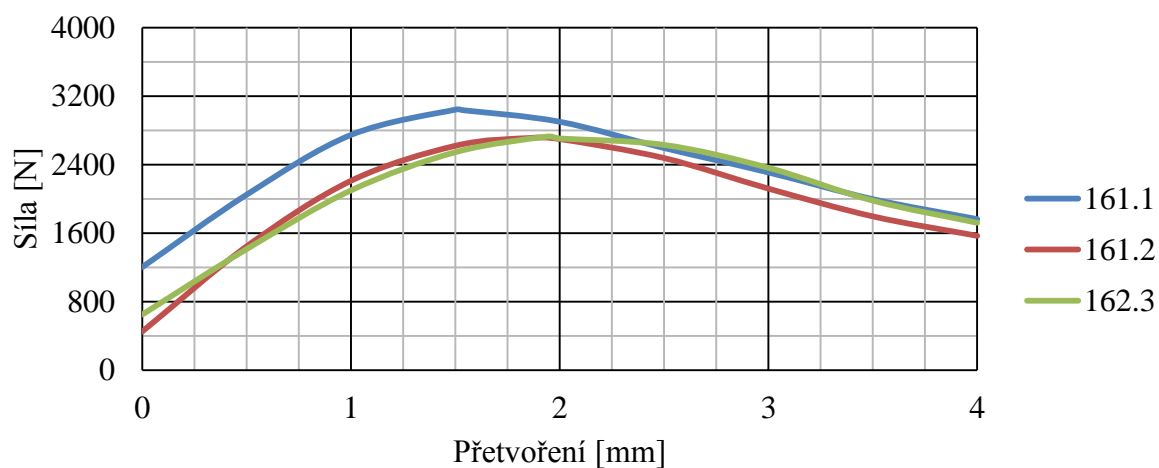


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs AER

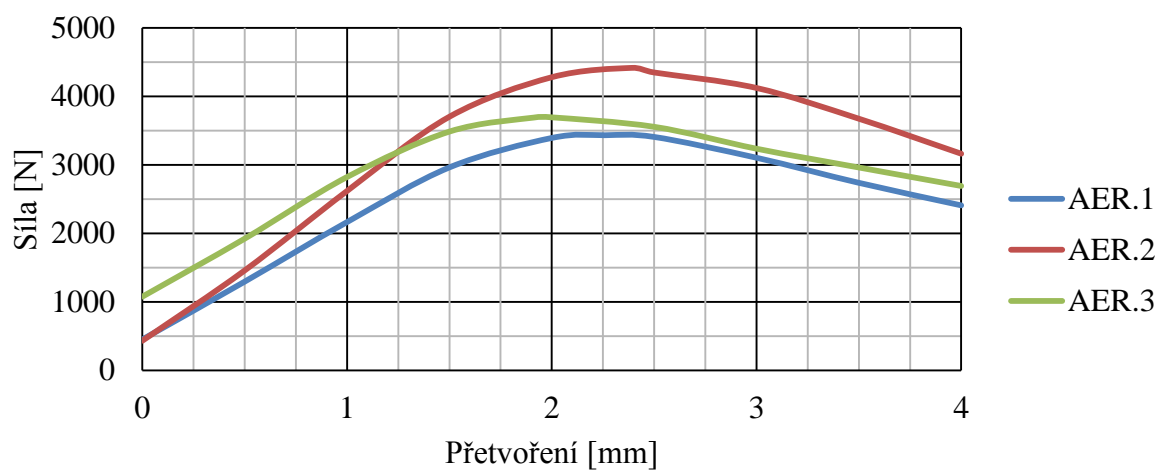
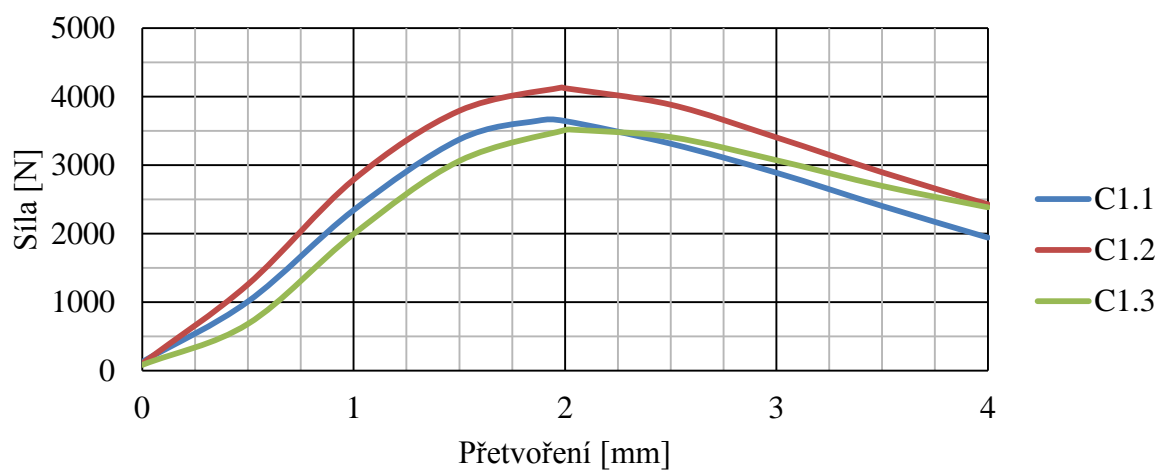


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs AEC1



Příloha F2 – Průběh zkoušky pevnosti v příčném tahu R_{it} při teplotě hutnění 20 °C

Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs AEC2

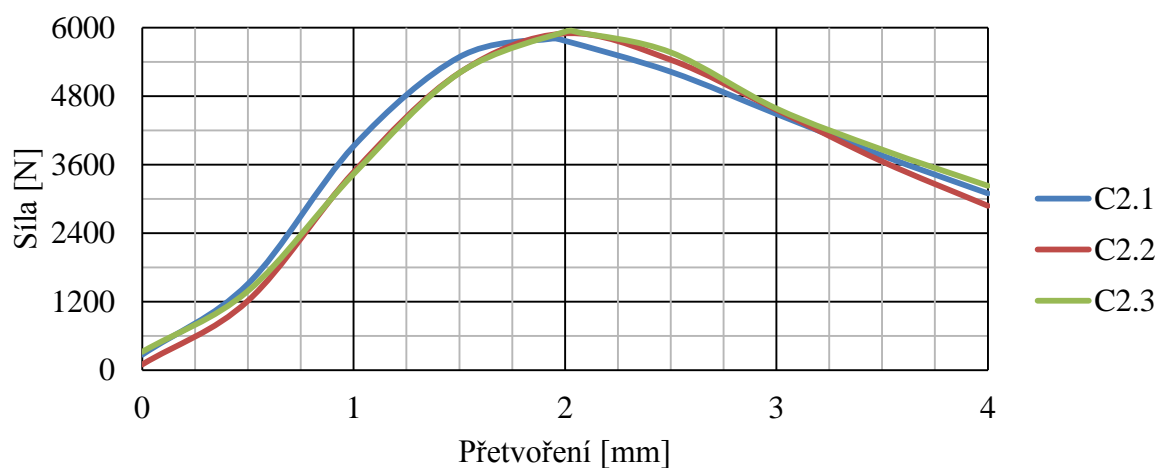
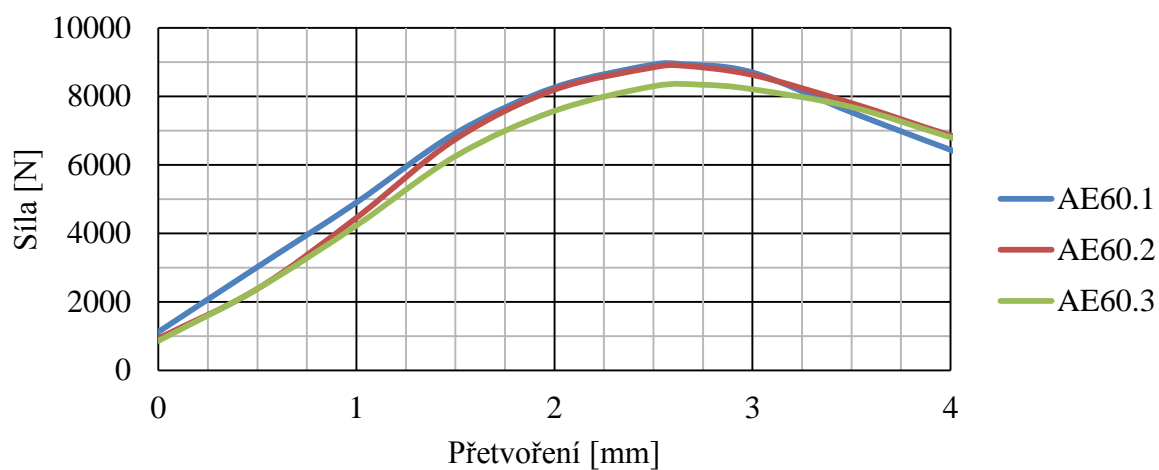


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs AE60



Příloha F3 – Pevnost v příčném tahu R_{it} při teplotě hutnění 60 °C

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Datum výroby	Hmotnost výroba	Datum zkoušení	Hmotnost zkoušení	Ztráta hmotnosti	Síla při porušení	Přetvoření	R_{it}	Průměr R_{it}
[-]	[-]	[-]	[g]	[-]	[g]	[%]	[N]	[mm]	[MPa]	[MPa]
AE	AE.1	4. 8. 2015	1 697,2	11. 8. 2015	1 666,5	1,81	9 575	2,00	0,63	0,63
	AE.2	4. 8. 2015	1 703,0	11. 8. 2015	1 671,0	1,88	10 002	2,45	0,64	
	AE.3	4. 8. 2015	1 717,6	11. 8. 2015	1 684,4	1,93	9 861	2,39	0,63	
R553	553.1	4. 8. 2015	1 705,5	11. 8. 2015	1 680,3	1,48	2 737	1,93	0,18	0,17
	553.2	4. 8. 2015	1 704,9	11. 8. 2015	1 682,4	1,32	2 606	1,90	0,17	
	553.3	4. 8. 2015	1 710,5	11. 8. 2015	1 685,7	1,45	2 571	1,81	0,17	
R182	182.1	4. 8. 2015	1 709,9	11. 8. 2015	1 690,9	1,11	1 100	1,48	0,07	0,07
	182.2	4. 8. 2015	1 701,2	11. 8. 2015	1 681,9	1,13	1 104	1,46	0,07	
	182.3	4. 8. 2015	1 708,0	11. 8. 2015	1 685,1	1,34	1 117	1,42	0,07	
R161	161.1	4. 8. 2015	1 703,9	11. 8. 2015	1 671,2	1,92	3 459	1,70	0,23	0,22
	161.2	4. 8. 2015	1 708,0	11. 8. 2015	1 672,0	2,11	3 338	1,72	0,22	
	161.3	4. 8. 2015	1 704,5	11. 8. 2015	1 668,5	2,11	3 340	1,66	0,22	
AER	AER.1	4. 8. 2015	1 706,8	11. 8. 2015	1 681,6	1,48	5 459	1,95	0,37	0,34
	AER.2	4. 8. 2015	1 703,9	11. 8. 2015	1 678,5	1,49	5 066	1,59	0,33	
	AER.3	4. 8. 2015	1 709,3	11. 8. 2015	1 682,1	1,59	4 788	1,90	0,31	

Příloha F4 – Průběh zkoušky pevnosti v příčném tahu R_{it} při teplotě hutnění 60 °C

Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs AE

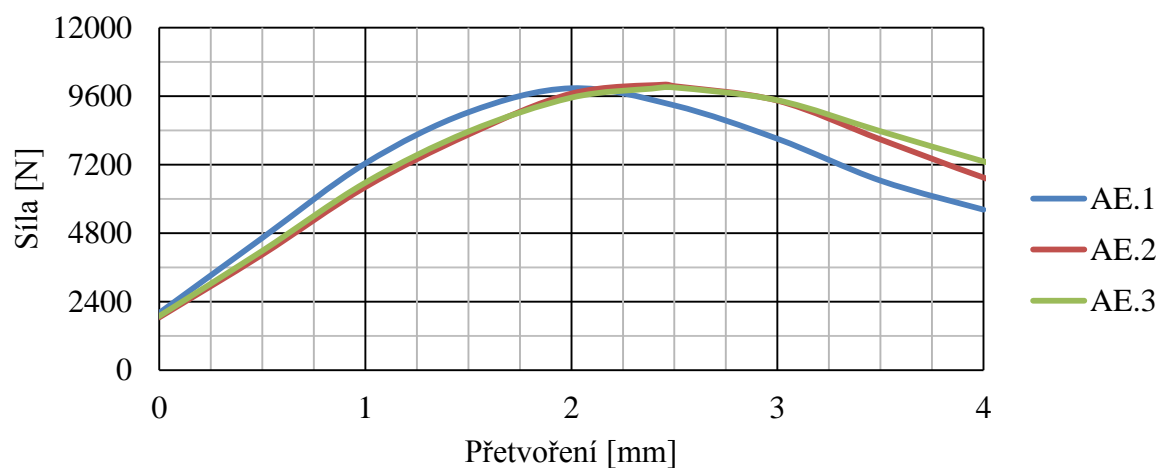


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs R553

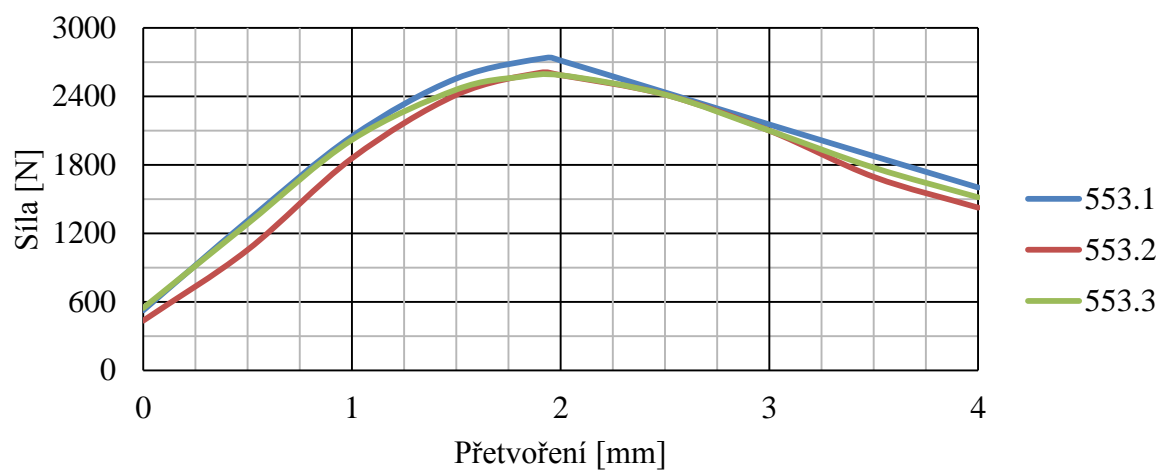
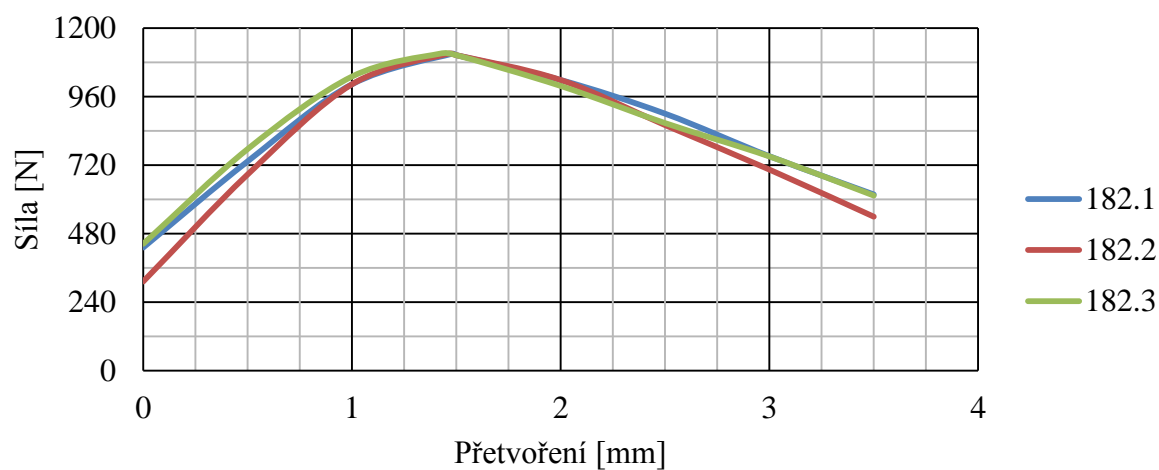


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs R182



Příloha F4 – Průběh zkoušky pevnosti v příčném tahu R_{it} při teplotě hutnění 60 °C

Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs R161

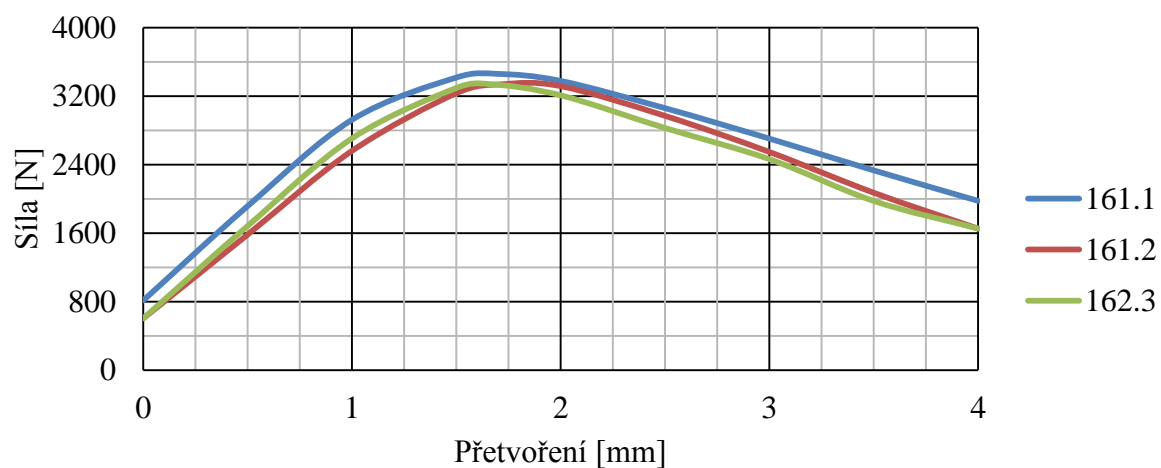
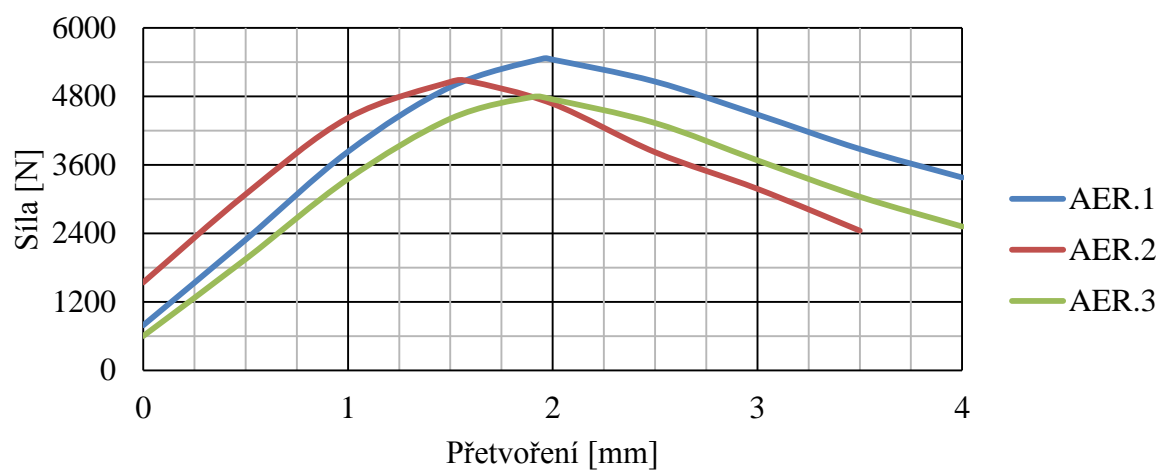


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_{it} směs AER



PŘÍLOHA G - Odolnost proti vodě

Příloha G1 – Odolnosti proti vodě při teplotě hutnění 20 °C

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Datum výroby	Hmotnost výroba	Datum zkoušení	Hmotnost zkoušení	Ztráta hmotnosti	Síla při porušení	Přetvoření	R_{it}	Průměr R_{it}
[-]	[-]	[-]	[g]	[-]	[g]	[%]	[N]	[mm]	[MPa]	[MPa]
AE	AE.4	28. 8. 2015	1 710,5	11. 9. 2015	1 760,7	-2,93%	1 437	1,09	0,09	0,10
	AE.5	28. 8. 2015	1 712,8	11. 9. 2015	1 760,0	-2,79%	1 686	1,05	0,10	
	AE.6	28. 8. 2015	1 700,8	11. 9. 2015	1 703,7	-0,17%	1 782	1,29	0,11	
AEC1	C1.4	31. 8. 2015	1 738,4	14. 9. 2015	1 765,9	-1,58%	4 369	1,49	0,27	0,23
	C1.5	31. 8. 2015	1 738,1	14. 9. 2015	1 763,7	-1,47%	3 660	1,53	0,22	
	C1.6	31. 8. 2015	1 741,5	14. 9. 2015	1 769,6	-1,61%	3 308	1,47	0,20	
AEC2	C2.4	1. 9. 2015	1 779,7	15. 9. 2015	1 809,7	-1,69%	7 689	1,56	0,48	0,54
	C2.5	1. 9. 2015	1 781,1	15. 9. 2015	1 803,9	-1,28%	9 412	1,42	0,59	
	C2.6	1. 9. 2015	1 771,9	15. 9. 2015	1 804,7	-1,85%	8 856	1,11	0,56	

Příloha G2 – Průběh zkoušky odolnosti proti vodě při teplotě hutnění 20 °C

Diagram síly a přetvoření při zkoušce odolnosti proti vodě směs AE

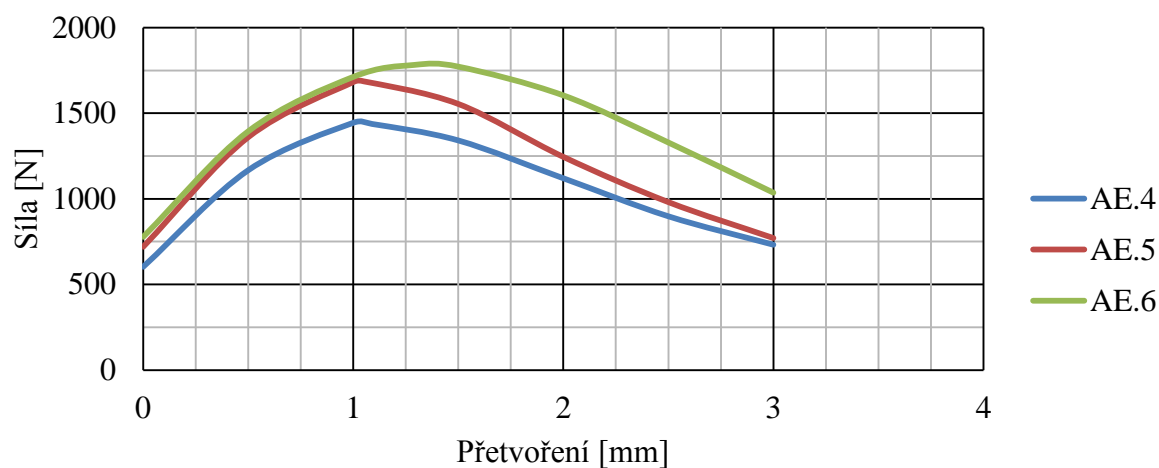


Diagram síly a přetvoření při zkoušce odolnost proti vodě směs AEC1

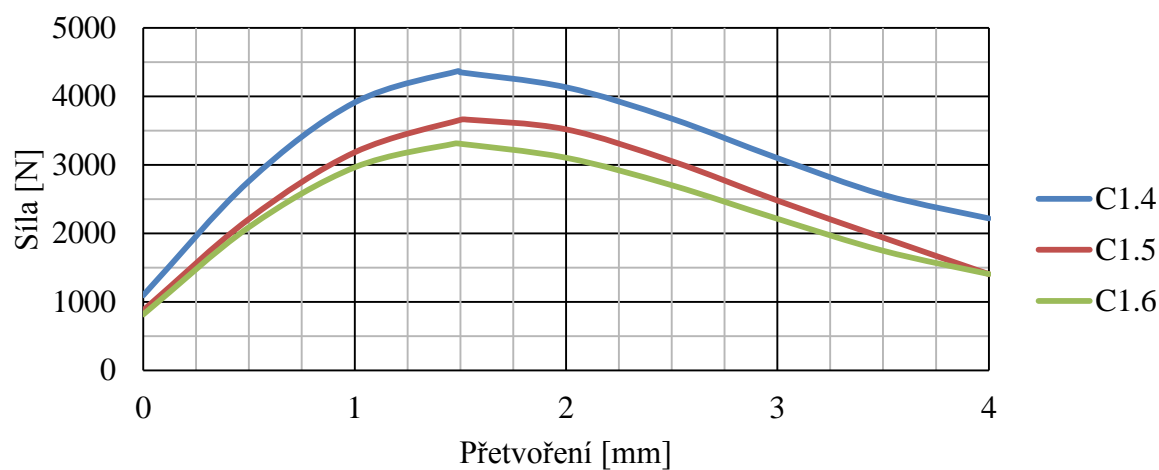
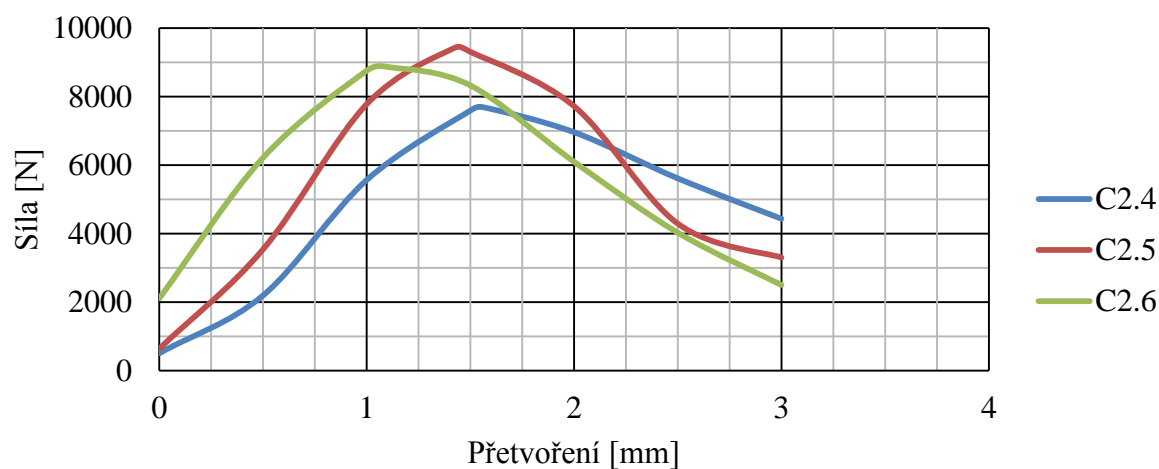


Diagram síly a přetvoření při zkoušce odolnost proti vodě směs AEC2



PŘÍLOHA H - Pevnost v tlaku (28 denní)

Příloha H1 – Pevnost v tlaku R_c při teplotě hutnění 20 °C

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Datum výroby	Hmotnost výroba	Datum zkoušení	Hmotnost zkoušení	Ztráta hmotnosti	Síla při porušení	Přetvoření	R_c	Průměr R_c
[-]	[-]	[-]	[g]	[-]	[g]	[%]	[N]	[mm]	[MPa]	[MPa]
AE	AE.1	12. 10. 2015	1715,2	9. 11. 2015	1669,8	2,65	9 742	2,51	1,24	1,19
	AE.2	12. 10. 2015	1714,6	9. 11. 2015	1670,7	2,56	8 999	2,64	1,15	
AEC1	C1.1	12. 10. 2015	1744,3	9. 11. 2015	1716,1	1,62	13 110	2,46	1,67	1,63
	C1.2	12. 10. 2015	1745,7	9. 11. 2015	1716,1	1,70	12 560	2,41	1,60	
AEC2	C2.1	12. 10. 2015	1786,8	9. 11. 2015	1763,6	1,30	19 000	2,11	2,42	2,12
	C2.2	12. 10. 2015	1786,0	9. 11. 2015	1762,8	1,30	14 270	2,27	1,82	

Příloha H2 – Průběh zkoušky pevnosti v tlaku R_c při teplotě hutnění 20 °C

Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_c směs AE

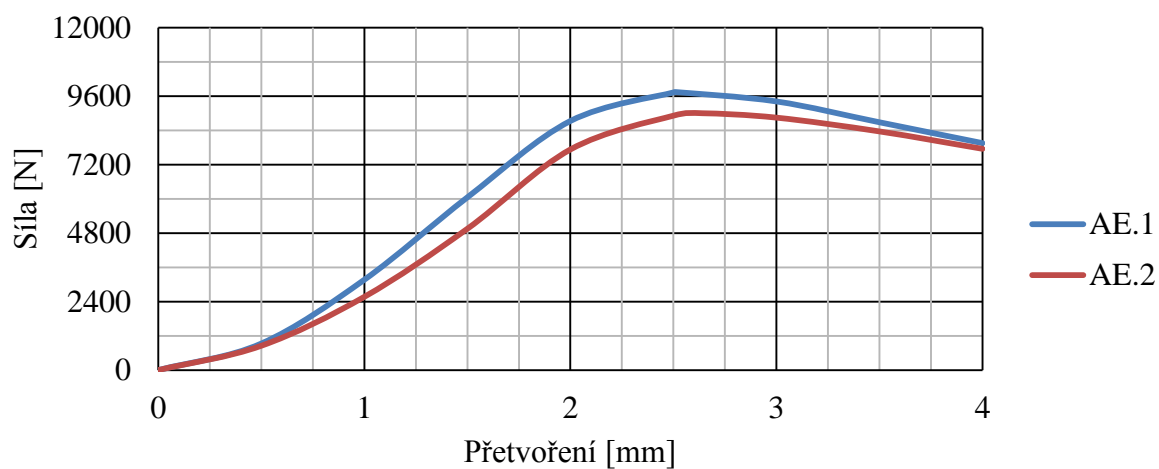


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_c směs AEC1

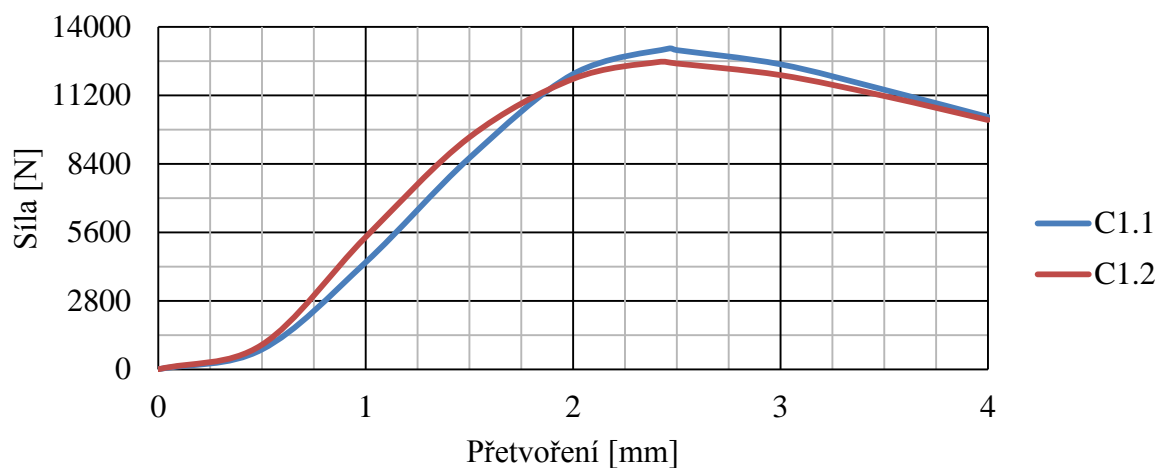
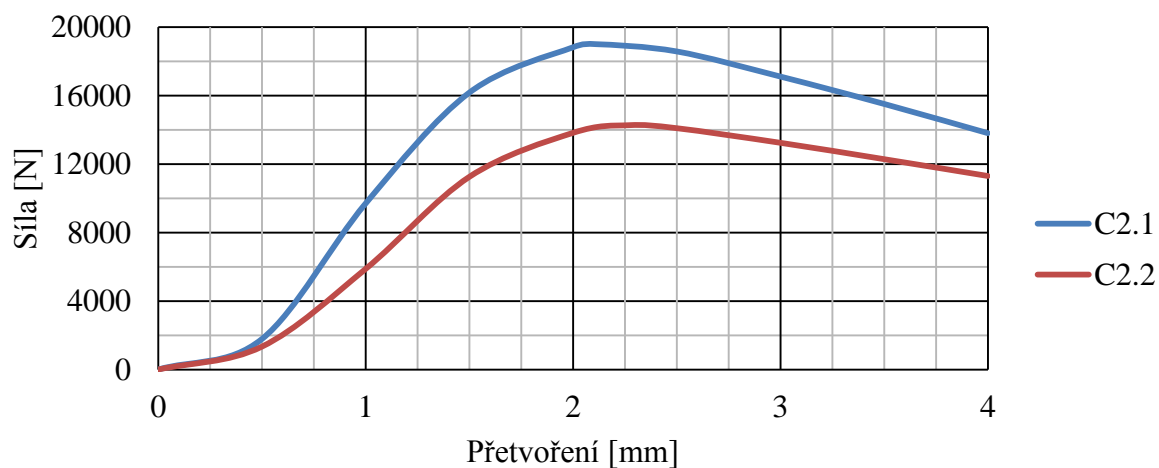


Diagram síly a přetvoření při zkoušce R_c směs AEC2



PŘÍLOHA I - Modul pružnosti (28 denní)

Výrobní protokol zkušebních těles

Ozn. směsi	Ozn. tělesa	Datum výroby	Hmotnost výroba	Výška tělesa	Objem tělesa	Objemová hmotnost	Mezerovitost	Datum zkoušení	Hmotnost zkoušení	Ztráta hmotnosti
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[cm ³]	[kg·m ⁻³]	[%]	[-]	[g]	[%]
AE	AE.1	31. 8. 2015	3 401,0	190,0	1 492,3	2 279,1	9,1	15. 12. 2015	3 320,1	2,38
	AE.2	31. 8. 2015	3 404,6	196,0	1 539,4	2 211,7	11,8	17. 12. 2015	3 318,8	2,52
	AE.3	31. 8. 2015	3 401,9	194,0	1 523,7	2 232,7	11,0	-	-	-
	AE.4	31. 8. 2015	3 413,0	195,0	1 531,5	2 228,5	11,1	-	-	-
AEC1	C1.1	1. 9. 2015	3 473,1	200,0	1 570,8	2 211,0	11,8	-	-	-
	C1.2	1. 9. 2015	3 461,3	200,0	1 570,8	2 203,5	12,1	16. 12. 2015	3 439,9	0,62
	C1.3	1. 9. 2015	3 495,6	198,0	1 555,1	2 247,8	10,4	17. 12. 2015	3 436,6	1,69
	C1.4	1. 9. 2015	3 482,6	199,0	1 562,9	2 228,2	11,2	18. 12. 2015	3 422,3	1,73
AEC2	C2.1	2. 9. 2015	3 559,9	200,0	1 570,8	2 266,3	9,6	16. 12. 2015	3 518,1	1,17
	C2.2	2. 9. 2015	3 570,6	200,0	1 570,8	2 273,1	9,4	-	-	-
	C2.3	2. 9. 2015	3 542,0	201,0	1 578,7	2 243,7	10,5	-	-	-
	C2.4	2. 9. 2015	3 535,0	197,0	1 547,2	2 284,7	8,9	18. 12. 2015	3 504,1	0,87

Označení směsi: AE

Označení vzorku: AE.1

Výška: 190,0 mm

Hmotnost: 3 401,0 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň nízkého napětí

Normové hodnoty			Naměřené hodnoty				
Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Poměrné přetvoření	Modul pružnosti
σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	ϵ [-]	E_r [MPa]
20	20	40	24,77	25,83	50,60	0,0004	136,81
20	35	55	19,94	40,57	60,51	0,0006	109,66
20	50	70	19,10	56,38	75,47	0,0006	124,85
20	70	90	20,46	76,40	96,86	0,0005	201,84
35	35	70	33,83	39,96	73,79	0,0005	163,57
35	50	85	35,48	55,48	90,96	0,0004	209,23
35	70	105	34,87	75,35	110,23	0,0004	256,12
35	90	125	35,22	94,94	130,17	0,0005	273,49
35	120	155	35,05	125,81	160,86	0,0006	269,93
50	50	100	49,29	55,28	104,57	0,0005	222,82
50	70	120	50,03	75,13	125,15	-	-
50	90	140	50,05	95,51	145,57	-	-
50	120	170	49,71	125,10	174,81	-	-
50	160	210	50,34	164,61	214,94	0,0006	388,47
70	70	140	69,18	74,92	144,10	0,0005	307,08
70	90	160	69,91	94,83	164,74	0,0004	369,94
70	120	190	70,14	125,19	195,33	0,0005	409,49
70	160	230	70,13	164,41	234,53	0,0005	458,64
70	200	270	69,98	204,21	274,19	0,0005	543,81
100	90	190	98,81	95,04	193,85	0,0004	546,61
100	120	220	100,06	124,46	224,52	0,0005	458,32
100	160	260	100,02	164,22	264,24	0,0005	522,35
100	200	300	100,06	204,26	304,32	0,0006	509,56
100	240	340	100,06	244,34	344,40	0,0005	665,75
150	120	270	148,61	125,12	273,73	0,0005	550,33
150	160	310	150,24	164,97	315,20	0,0005	590,37
150	200	350	149,99	204,66	354,66	0,0005	679,84
150	240	390	149,92	244,33	394,25	0,0005	761,21
150	300	450	150,06	304,31	454,37	0,00	706,21

Označení směsi: AE

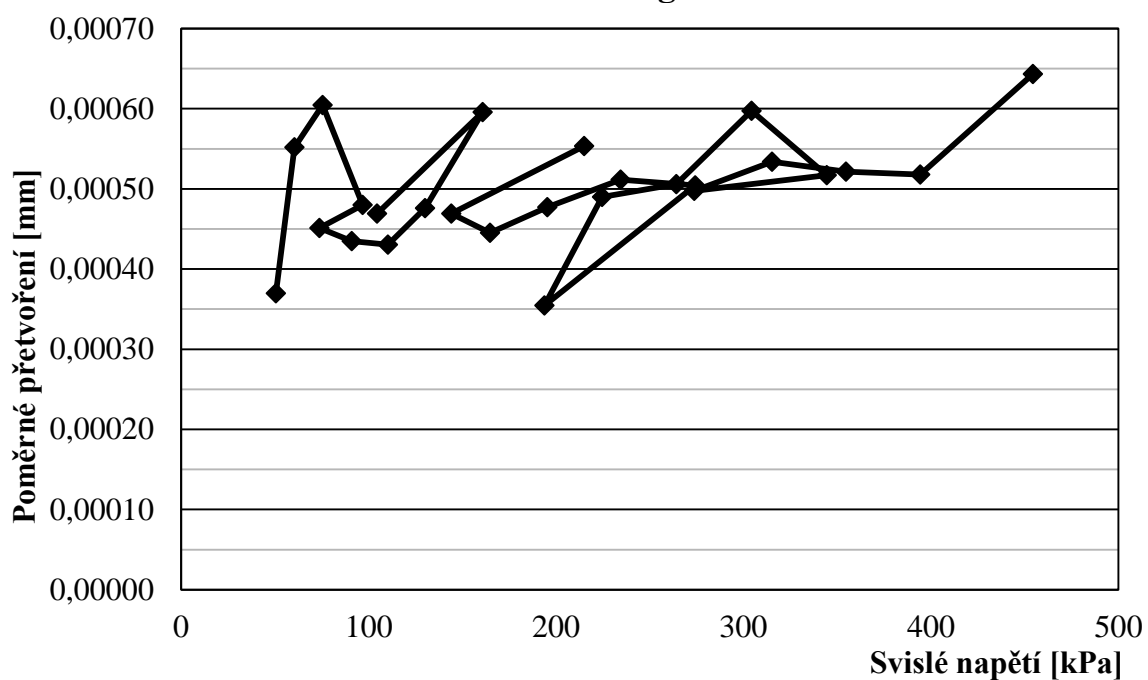
Označení vzorku: AE.1

Výška: 190,0 mm

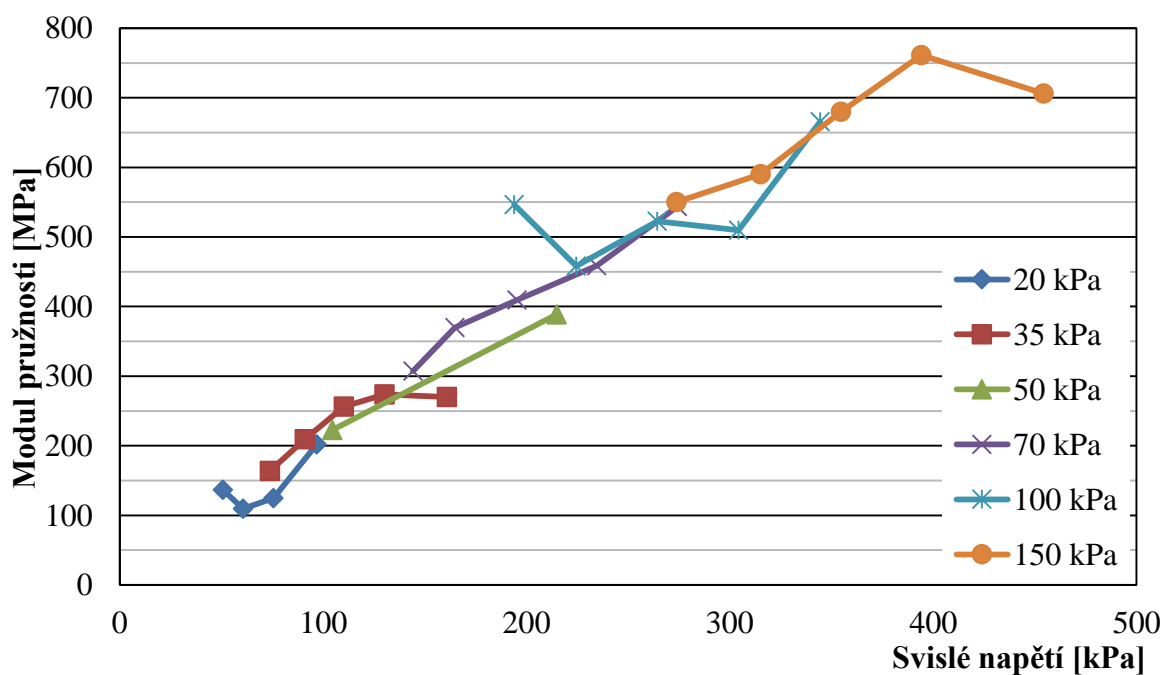
Hmotnost: 3 401,0 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň nízkého napětí

Pracovní diagram



Modul pružnosti



Označení směsi: AE

Označení vzorku: AE.2

Výška: 196,0 mm

Hmotnost: 3 404,6 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň vysokého napětí

Normové hodnoty			Naměřené hodnoty				
Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Poměrné přetvoření	Modul pružnosti
σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	ϵ [-]	E_r [MPa]
20	30	50	24,59	35,85	60,44	0,0005	124,50
20	50	70	19,38	54,75	74,13	0,0004	181,72
20	80	100	19,82	86,15	105,97	0,0006	164,48
20	115	135	20,25	121,17	141,42	0,0006	244,90
35	50	85	34,59	55,25	89,85	0,0004	250,31
35	80	115	35,08	85,53	120,61	0,0005	255,12
35	115	150	34,57	120,57	155,14	0,0005	305,85
35	150	185	35,33	154,65	189,98	0,0006	324,99
35	200	235	35,32	204,59	239,91	0,0006	401,69
50	80	130	49,26	85,29	134,55	0,0004	332,58
50	115	165	49,66	119,60	169,26	-	-
50	150	200	50,49	154,44	204,93	-	-
50	200	250	50,02	204,03	254,06	-	-
50	280	330	49,79	283,74	333,53	0,0008	441,08
70	115	185	69,45	119,42	188,87	0,0004	485,13
70	150	220	70,13	154,48	224,61	0,0005	439,69
70	200	270	70,19	204,28	274,47	0,0005	499,40
70	280	350	70,10	284,00	354,10	0,0007	523,10
70	340	410	69,69	343,83	413,53	0,0009	482,32
100	150	250	99,53	154,15	253,68	0,0005	534,92
100	200	300	99,69	203,51	303,20	0,0005	563,40
100	280	380	100,24	284,12	384,36	0,0007	573,02
100	340	440	100,13	344,12	444,25	0,0007	628,88
100	400	500	99,90	403,86	503,77	0,0008	651,51
150	200	350	148,70	204,14	352,84	0,0005	737,74
150	280	430	150,15	284,40	434,55	0,0007	584,82
150	340	490	149,88	344,20	494,08	0,0006	767,03
150	400	550	150,31	404,05	554,36	0,0008	679,31
150	475	625	149,80	478,81	628,60	0,00	743,06

Označení směsi: AE

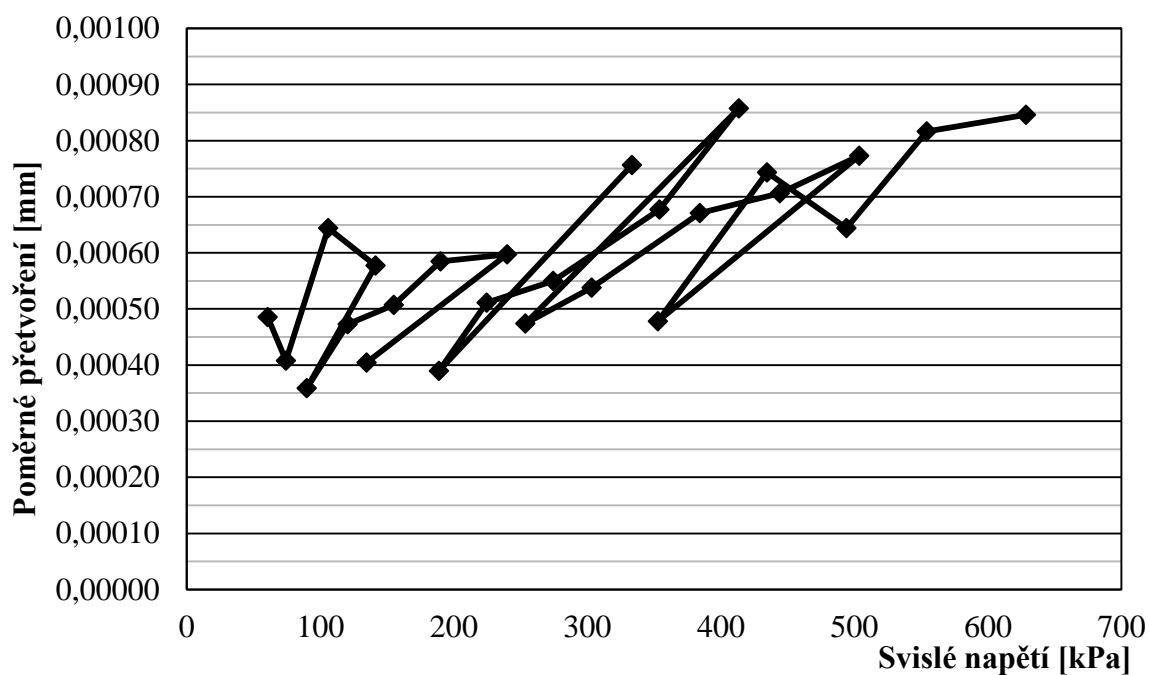
Označení vzorku: AE.2

Výška: 196,0 mm

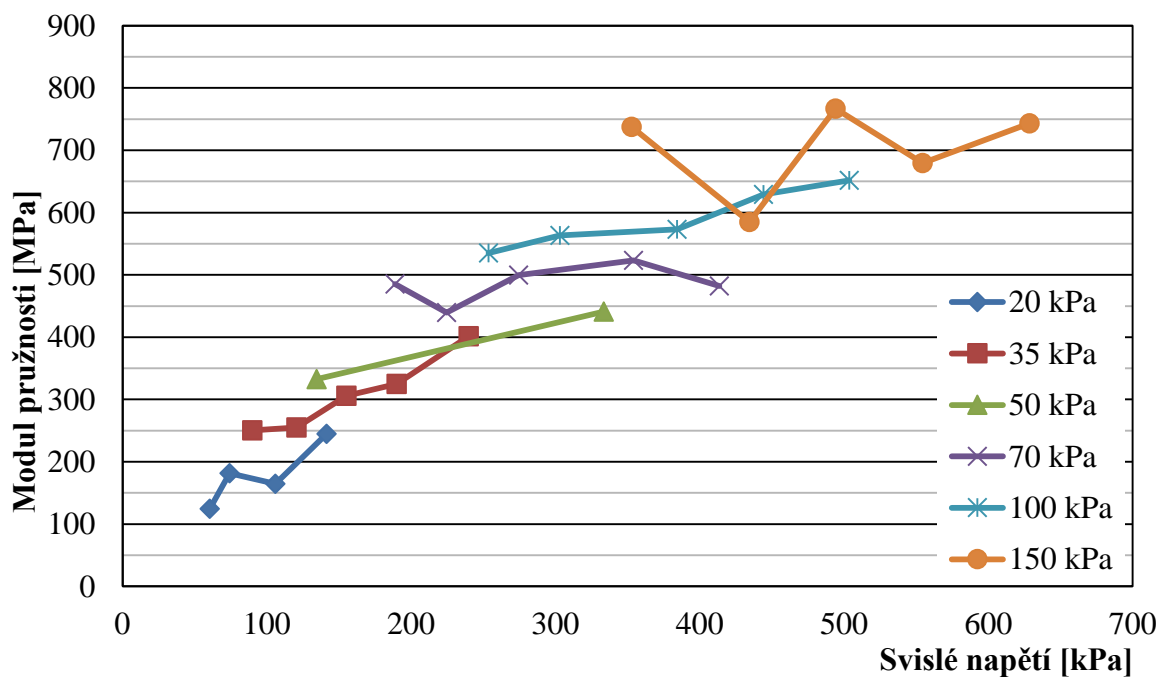
Hmotnost: 3 404,6 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň vysokého napětí

Pracovní diagram



Modul pružnosti



Označení směsi: AEC1

Označení vzorku: C1.2

Výška: 200,0 mm

Hmotnost: 3 461,3 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň nízkého napětí

Normové hodnoty			Naměřené hodnoty				
Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Poměrné přetvoření	Modul pružnosti
σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	ϵ [-]	E_r [MPa]
20	20	40	25,31	25,96	51,27	0,0004	118,21
20	35	55	19,83	40,24	60,07	0,0005	133,39
20	50	70	19,71	54,57	74,28	0,0006	128,56
20	70	90	19,96	75,52	95,48	0,0006	170,18
35	35	70	34,58	40,13	74,71	0,0005	164,71
35	50	85	34,56	55,10	89,66	0,0005	178,93
35	70	105	35,05	75,37	110,42	0,0005	217,48
35	90	125	35,13	95,01	130,14	0,0006	207,22
35	120	155	35,27	125,54	160,81	0,0006	266,15
50	50	100	48,97	54,56	103,53	0,0004	249,58
50	70	120	50,15	74,65	124,80	-	-
50	90	140	50,25	95,44	145,69	-	-
50	120	170	50,07	125,12	175,19	-	-
50	160	210	49,78	164,84	214,62	0,0006	351,50
70	70	140	69,59	74,71	144,29	0,0005	317,03
70	90	160	69,97	94,97	164,94	0,0005	352,18
70	120	190	70,11	124,60	194,71	0,0006	319,77
70	160	230	70,03	164,83	234,86	0,0006	413,95
70	200	270	70,08	203,59	273,67	0,0007	399,27
100	90	190	98,71	95,20	193,91	0,0004	446,29
100	120	220	100,15	124,90	225,05	0,0005	462,68
100	160	260	100,04	164,48	264,52	0,0006	448,93
100	200	300	100,19	204,27	304,46	0,0006	500,36
100	240	340	100,12	244,13	344,25	0,0007	473,92
150	120	270	148,42	125,62	274,04	0,0004	641,65
150	160	310	149,88	164,27	314,15	0,0006	526,07
150	200	350	150,07	203,80	353,88	0,0006	620,01
150	240	390	150,22	244,48	394,70	0,0007	590,80
150	300	450	150,01	303,70	453,71	0,00	636,47

Označení směsi: AEC1

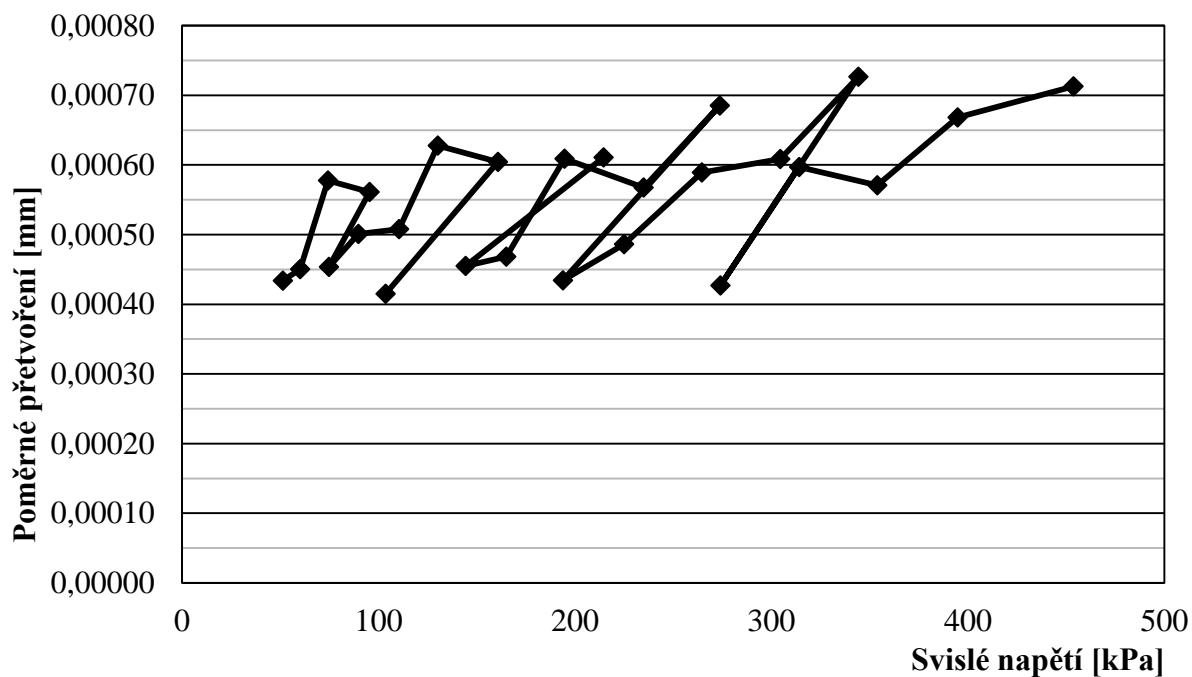
Označení vzorku: C1.2

Výška: 200,0 mm

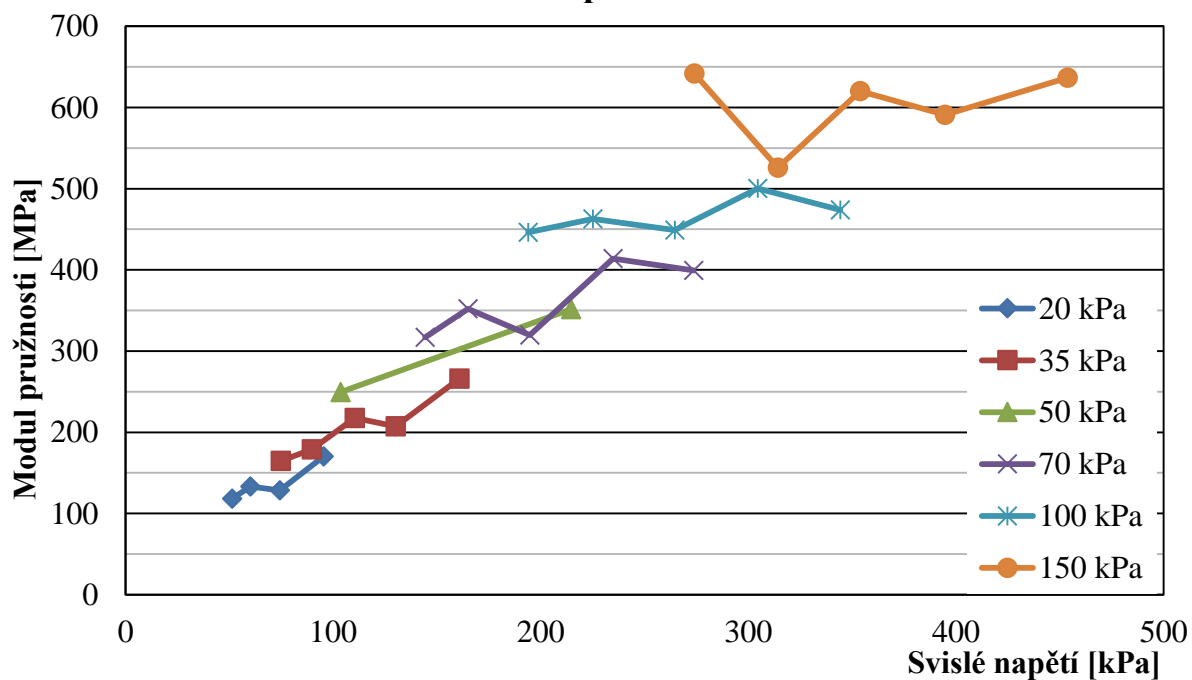
Hmotnost: 3 461,3 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň nízkého napětí

Pracovní diagram



Modul pružnosti



Označení směsi: AEC1

Označení vzorku: C1.4

Výška: 199,0 mm

Hmotnost: 3 482,6 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň vysokého napětí

Normové hodnoty			Naměřené hodnoty				
Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Poměrné přetvoření	Modul pružnosti
σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	ϵ [-]	E_r [MPa]
20,00	30,00	50,00	24,25	35,72	59,97	0,0004	145,15
20,00	50,00	70,00	20,24	55,27	75,51	0,0005	166,49
20,00	80,00	100,00	19,49	85,36	104,85	0,0005	192,21
20,00	115,00	135,00	19,78	120,92	140,70	0,0006	238,55
35,00	50,00	85,00	34,66	54,53	89,19	0,0004	208,20
35,00	80,00	115,00	35,42	85,11	120,53	0,0004	285,08
35,00	115,00	150,00	34,90	119,80	154,70	0,0005	301,14
35,00	150,00	185,00	34,79	154,84	189,63	0,0006	316,16
35,00	200,00	235,00	35,41	204,18	239,58	0,0005	437,53
50,00	80,00	130,00	49,22	85,12	134,34	0,0004	322,98
50,00	115,00	165,00	50,05	119,75	169,80	-	-
50,00	150,00	200,00	50,21	154,56	204,77	-	-
50,00	200,00	250,00	50,18	203,90	254,08	-	-
50,00	280,00	330,00	49,88	283,77	333,65	0,0006	555,67
70,00	115,00	185,00	69,42	120,66	190,08	0,0005	403,55
70,00	150,00	220,00	70,32	154,73	225,04	0,0005	459,27
70,00	200,00	270,00	69,98	203,91	273,89	0,0005	569,27
70,00	280,00	350,00	69,92	283,67	353,59	0,0006	601,45
70,00	340,00	410,00	70,09	344,13	414,22	0,0007	630,28
100,00	150,00	250,00	99,10	153,98	253,08	0,0004	668,78
100,00	200,00	300,00	100,10	203,78	303,88	0,0005	555,61
100,00	280,00	380,00	100,09	284,01	384,11	0,0005	711,63
100,00	340,00	440,00	100,29	344,18	444,46	0,0006	754,31
100,00	400,00	500,00	99,85	403,46	503,30	0,0007	761,74
150,00	200,00	350,00	148,78	203,70	352,48	0,0005	685,46
150,00	280,00	430,00	150,18	283,57	433,75	0,0006	751,17
150,00	340,00	490,00	150,10	343,64	493,74	0,0005	923,35
150,00	400,00	550,00	149,93	403,12	553,05	0,0006	888,90
150,00	475,00	625,00	150,11	478,36	628,47	0,00	916,38

Označení směsi: AEC1

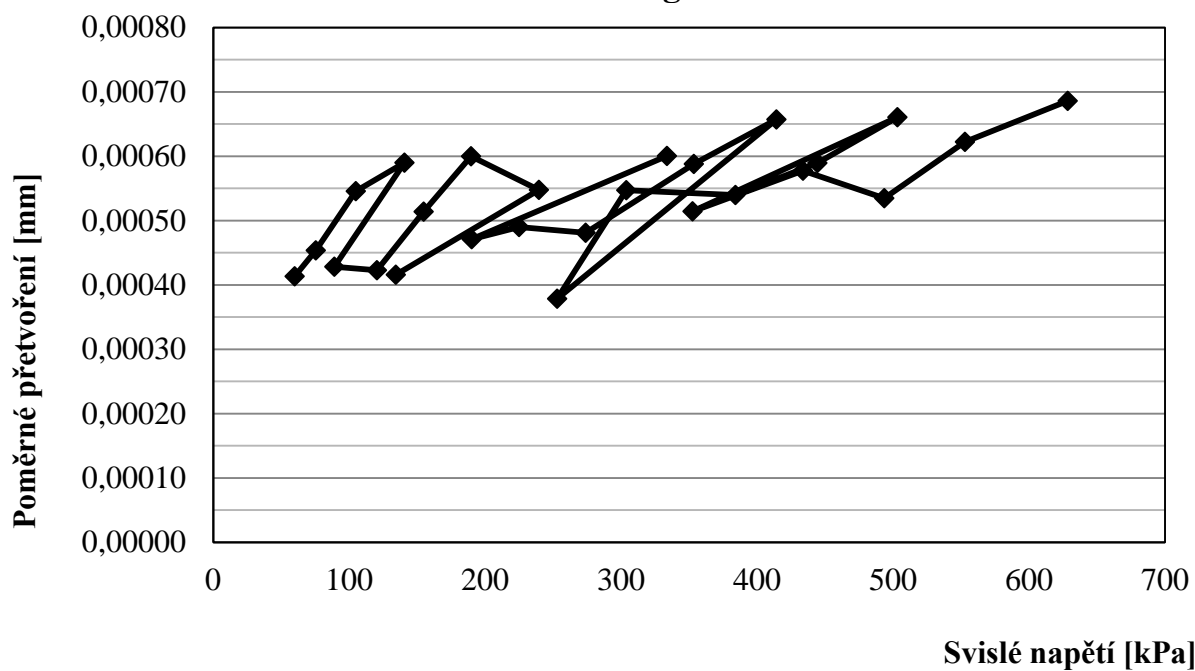
Označení vzorku: C1.4

Výška: 199,0 mm

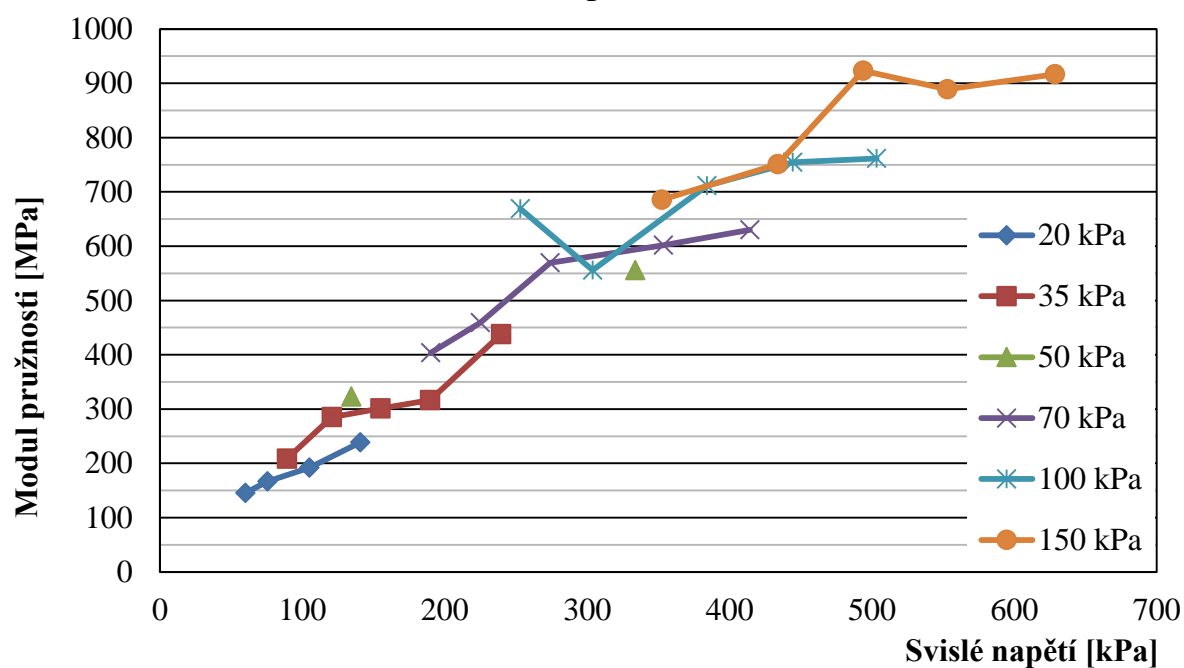
Hmotnost: 3 482,6 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň vysokého napětí

Pracovní diagram



Modul pružnosti



Označení směsi: AEC2

Označení vzorku: C2.1

Výška: 200,0 mm

Hmotnost: 3 559,9 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň nízkého napětí

Normové hodnoty			Naměřené hodnoty				
Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Poměrné přetvoření	Modul pružnosti
σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	ϵ [-]	E_r [MPa]
20	20	40	24,75	26,56	51,31	0,0004	120,88
20	35	55	20,08	40,35	60,44	0,0006	107,56
20	50	70	19,46	55,85	75,31	0,0006	117,70
20	70	90	19,87	75,30	95,17	0,0006	148,87
35	35	70	33,96	40,20	74,17	0,0005	158,69
35	50	85	35,56	55,46	91,03	0,0005	177,72
35	70	105	34,64	75,42	110,06	0,0007	167,71
35	90	125	35,37	95,55	130,92	0,0006	225,66
35	120	155	35,05	125,41	160,46	0,0007	237,53
50	50	100	49,32	55,59	104,91	0,0005	198,15
50	70	120	50,08	75,49	125,57	-	-
50	90	140	50,03	95,06	145,08	-	-
50	120	170	49,74	124,81	174,54	-	-
50	160	210	50,23	164,59	214,82	0,0006	349,17
70	70	140	69,27	75,36	144,63	0,0005	282,71
70	90	160	70,04	95,35	165,39	0,0005	303,61
70	120	190	70,20	125,11	195,32	0,0005	369,70
70	160	230	69,90	164,96	234,86	0,0006	378,16
70	200	270	69,87	203,79	273,66	0,0007	393,24
100	90	190	99,40	94,61	194,01	0,0005	376,28
100	120	220	100,04	125,34	225,38	0,0006	396,66
100	160	260	100,13	164,55	264,67	0,0005	507,65
100	200	300	100,06	203,98	304,04	0,0006	505,18
100	240	340	100,04	244,04	344,08	0,0006	532,08
150	120	270	148,39	125,05	273,45	0,0004	718,25
150	160	310	149,98	165,22	315,20	0,0005	628,62
150	200	350	150,29	204,35	354,64	0,0006	611,79
150	240	390	150,01	244,36	394,37	0,0006	699,39
150	300	450	150,08	303,82	453,90	0,00	597,18

Označení směsi: AEC2

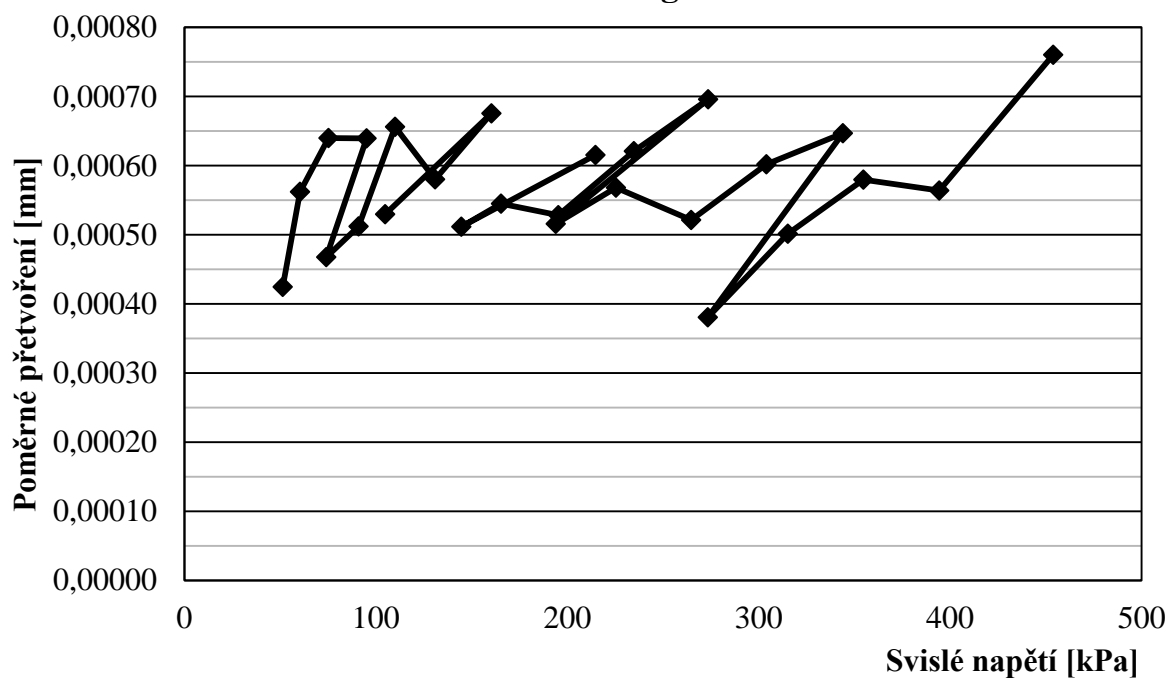
Označení vzorku: C2.1

Výška: 200,0 mm

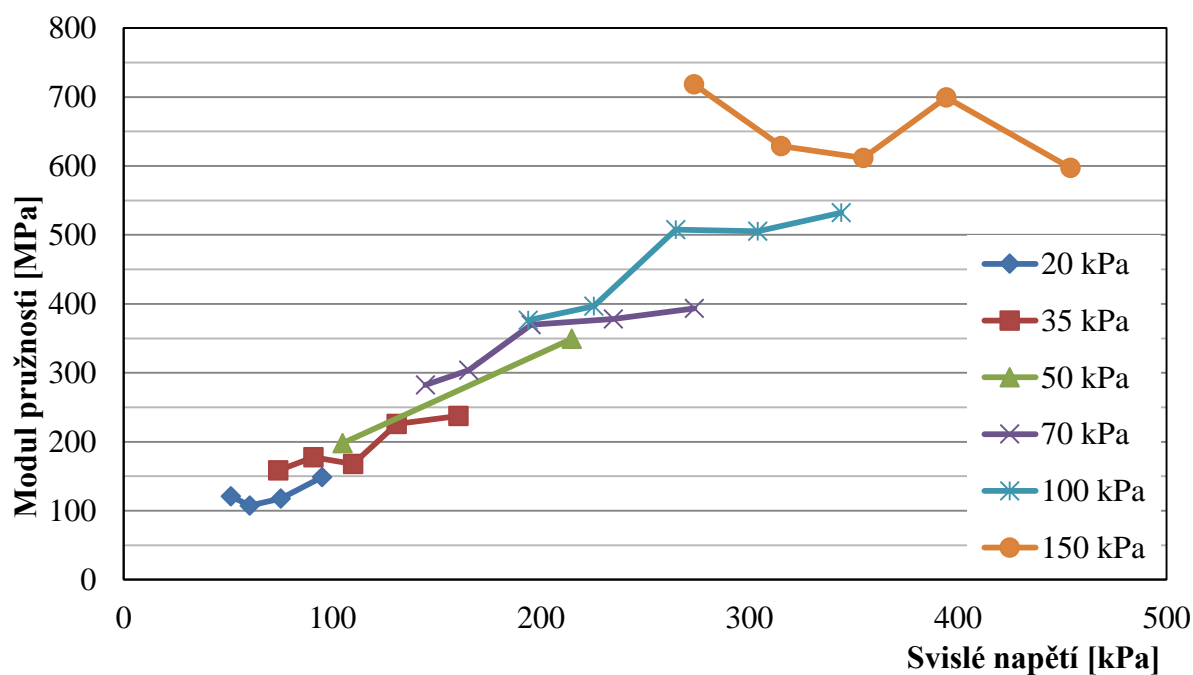
Hmotnost: 3 559,9 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň nízkého napětí

Pracovní diagram



Modul pružnosti



Označení směsi: AEC2

Označení vzorku: C2.1

Výška: 200,0 mm

Hmotnost: 3 559,9 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň vysokého napětí

Normové hodnoty			Naměřené hodnoty				
Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Komorový tlak	Deviátor napětí	Svislé napětí	Poměrné přetvoření	Modul pružnosti
σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	σ_1 [kPa]	ϵ [-]	E_r [MPa]
20	30	50	24,61	36,05	60,66	0,0004	136,80
20	50	70	20,21	56,08	76,29	0,0006	124,40
20	80	100	19,83	86,73	106,56	0,0007	160,35
20	115	135	20,04	121,44	141,48	0,0007	197,44
35	50	85	33,59	55,78	89,37	0,0005	184,75
35	80	115	35,30	86,04	121,34	0,0006	194,92
35	115	150	35,11	119,84	154,95	0,0006	251,40
35	150	185	34,87	154,64	189,51	0,0008	248,26
35	200	235	34,75	204,60	239,35	0,0007	329,48
50	80	130	49,55	85,67	135,22	0,0006	231,83
50	115	165	50,10	120,16	170,26	-	-
50	150	200	50,28	154,80	205,09	-	-
50	200	250	50,06	204,26	254,33	-	-
50	280	330	49,72	283,70	333,42	0,0008	427,20
70	115	185	69,57	119,95	189,52	0,0005	360,52
70	150	220	70,06	154,81	224,88	0,0007	324,76
70	200	270	69,84	204,56	274,40	0,0007	376,17
70	280	350	70,23	284,15	354,37	0,0008	458,39
70	340	410	70,02	343,84	413,86	0,0008	502,99
100	150	250	99,18	154,98	254,15	0,0005	471,55
100	200	300	99,94	204,04	303,98	0,0006	492,44
100	280	380	99,95	283,95	383,91	0,0007	551,34
100	340	440	100,20	344,05	444,25	0,0007	612,38
100	400	500	99,91	403,52	503,42	0,0007	687,77
150	200	350	148,34	204,23	352,57	0,0006	561,29
150	280	430	150,15	284,62	434,77	0,0007	648,34
150	340	490	150,12	344,15	494,26	0,0007	699,43
150	400	550	150,16	404,20	554,36	0,0007	767,09
150	475	625	149,80	478,89	628,69	0,00	752,84

Označení směsi: AEC2

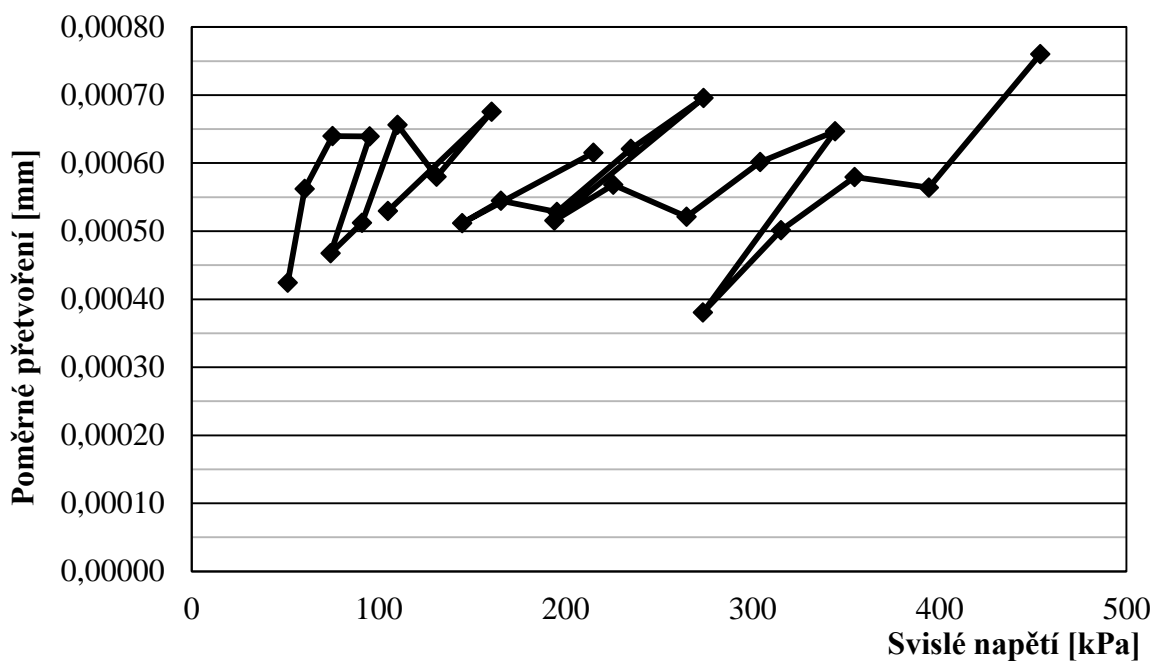
Označení vzorku: C2.1

Výška: 200,0 mm

Hmotnost: 3 559,9 g

Způsob zkoušení: ČSN EN 13286 – 7, metoda B – úroveň vysokého napětí

Pracovní diagram



Modul pružnosti

